



TUGAS AKHIR – TM141585

ANALISIS KERUSAKAN *SPHERICAL ROLLER BEARING* PADA *BOGIE WHEEL STACKER/RECLAIMER* BATUBARA

SARIN AZISTARINI
02111645000060

Dosen Pembimbing:
Ir. Suwarmin, PE

JURUSAN TEKNIK MESIN
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya
2018



FINAL PROJECT – TM141585

**FAILURE ANALYSIS OF SPHERICAL ROLLER
BEARING IN A COAL BOGIE WHEEL
STACKER/RECLAIMER**

SARIN AZISTARINI
02111645000060

Supervisor:
Ir. Suwarmin, PE

DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING
Faculty of Industrial Technology
Sepuluh Nopember Institute of Technology
Surabaya
2018

LEMBAR PENGESAHAN

ANALISIS KERUSAKAN SPHERICAL ROLLER BEARING PADA BOGIE WHEEL STACKER/RECLAIMER BATUBARA

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat Memperoleh Gelar
Sarjana Teknik

pada

Bidang Studi Otomasi Industri
Program Studi S1 Jurusan Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

Sarin Azistarini

NRP. 02111645000060

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir

1. Ir. Suwarmin, PE (Pembimbing)
(NIP. 196103141987001001)
2. Dr. Eng. Sutikno, S.E., M.T. (Penguji I)
(NIP. 197407032000031001)
3. Nur Ikhwan, S.T., M.Eng. (Penguji II)
(NIP. 196709151995121001)
4. Ir. Arino Anzip, M.Eng.Sc. (Penguji III)
(NIP. 196107141988031003)

SURABAYA

JULI, 2018

ANALISIS KERUSAKAN SPHERICAL ROLLER BEARING PADA BOGIE WHEEL STACKER/RECLAIMER BATUBARA

Nama : Sarin Azistarini
NRP : 02111645000060
Jurusan : Teknik Mesin FTI-ITS
Dosen Pembimbing : Ir. Suwarmin, PE

Abstrak

Di suatu power plant dalam prosesnya terdapat kegiatan yang disebut dengan coal handling system yaitu memindahkan batu bara dari ship unloader hingga coal bunker. Salah satu alat krusial pada coal handling system yaitu stacker/reclaimer yang berfungsi untuk memindahkan batu bara dari ship unloader ke stock pile maupun dari stock pile ke coal bunker. Akan tetapi menurut data dari power plant pada tahun 2011 – 2017 bearing pada wheel stacker/reclaimer banyak mengalami kerusakan yaitu stacker/reclaimer 1 terdapat 15 kerusakan dan stacker/reclaimer 2 terdapat 18 kerusakan. Padahal sebelumnya kerusakan bearing pada wheel stacker/reclaimer hanya terjadi 1 kerusakan dalam 10 tahun. Hal inilah yang melatar belakangi diangkatnya topik Tugas Akhir ini yaitu untuk menganalisa penyebab dari kerusakan bearing yang menjadi lebih sering.

Penelitian ini menggunakan beberapa analisa untuk mengetahui penyebab kerusakan dari bearing yaitu analisa pembebanan dan pelumasan. Digunakan metode rolling contact fatigue untuk menganalisa kerusakan bearing pada wheel stacker/reclaimer yang ditinjau dari sisi pembebanan dan untuk meninjau dari sisi pelumasan digunakan analisa perhitungan pelumasan dengan membandingkan kondisi aktual dan kondisi seharusnya.

Hasil yang didapatkan pada Tugas Akhir ini adalah untuk pembebanan kondisi aktual pada bearing masih di bawah pembebanan yang diijinkan yaitu sebesar 293,96 kN dan beban

contact fatigue sebesar 440,94 kN sedangkan beban yang diijinkan sebesar 572 kN. Sedangkan untuk jumlah pelumasan yang dibutuhkan pada kondisi aktual tidak memenuhi jumlah pelumasan yang seharusnya yaitu sebesar 7,2 ml/day untuk kondisi aktual sedangkan pelumasan yang dibutuhkan sebesar 11,52 ml/day.

Kata kunci: *analisa kegagalan, spherical roller bearing, stacker/reclaimer, contact fatigue*

FAILURE ANALYSIS OF SPHERICAL ROLLER BEARING IN A COAL BOGIE WHEEL STACKER/RECLAIMER

Name : Sarin Azistarini
NRP : 02111645000060
Department : Mechanical Engineering FTI-ITS
Supervisor : Ir. Suwarmin, PE

Abstract

In a power plant process there is an activity called the coal handling system that is moving coal from the ship unloader to the coal bunker. One of the crucial tools in coal handling system is the stacker/reclaimer, it has function to move coal from the ship unloader to stock pile or from the stock pile to the coal bunker. According to data from the power plant in 2011 – 2017 there are many bearing in wheel stacker/reclaimer suffered damage, there are 15 damage bearing on stacker/reclaimer 1 and 18 damage bearing on stacker/reclaimer 2. Whereas before the damage bearings in wheel stacker/reclaimer occur only 1 damage in 10 years. This is the background of this final project topic is to analyze the causes of damage to bearings that become more frequent.

In this study use some analysis to know the causes of damage bearing those are loading and lubrication analysis. To analyze the bearing damage on the wheel stacker using rolling contact fatigue method in terms of loading. To analyze the lubrication using lubrication calculation analysis by comparing the actual condition and the required condition.

The results obtained in this Final Project is the actual loading condition on the bearing is under the allowable load that is equal to 293,96 kN and load for contact fatigue is equal to 440,94 kN while the allowable load is 572 kN. While the required amount of lubrication at the actual condition is under the required amount of lubrication of 7.2 ml / day for actual conditions while the required lubrication is 11.52 ml / day.

Keywords: *failure analysis, spherical roller bearing, stacker/reclaimer, contact fatigue*

KATA PENGANTAR

Alhamdulillah segala puji dan syukur saya panjatkan kehadirat Allah SWT. Karena atas rahmat dan hidayah - Nya, tugas akhir yang berjudul “**Analisis Kerusakan *Spherical Roller Bearing* pada *Bogie Wheel Stacker/Reclaimer Batubara*”** ini dapat disusun dan diselesaikan dengan baik dan lancar.

Tugas Akhir ini merupakan salah satu persyaratan yang harus dipenuhi oleh setiap mahasiswa Program Studi S1 Teknik Mesin ITS, sesuai dengan kurikulum yang telah ditetapkan. Selain itu, Tugas Akhir ini juga merupakan suatu bukti yang diberikan almamater dan masyarakat.

Banyak dorongan dan bantuan yang penulis dapatkan selama penyusunan Tugas Akhir ini sampai terselesaikannya laporan. Untuk itu penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih dan penghargaan sebesar-besarnya kepada :

1. Bapak Ir. Suwarmin, PE sebagai Dosen Pembimbing yang telah dengan sangat sabar, tidak bosan-bosannya membantu dan memberikan ide serta ilmu hingga terselesaikannya Tugas Akhir ini.
2. Bapak Dosen penguji yang telah memberikan kritik dan saran dalam penyempurnaan dan pengembangan Tugas Akhir ini.
3. Ibu Vivien Suphandani Djanali S.T., ME., PhD. selaku dosen wali yang telah membimbing selama Penulis berkuliah.
4. PT. YTL Jawa Timur, khususnya Bapak Adityawarman Surya Buwana, S.T. dan Bapak Rendy Kristanto, S.T. selaku pembimbing saat pengambilan data
5. Keluarga Penulis, terutama Ayah dr. Ahmad Aziz dan Mama Erma Sari, S.Sos., serta adik-adik tercinta Sandita Azistasari, Jevisa Santrisari Aziz, Sabita Santrisari Aziz yang benar-benar memberikan dorongan semangat dengan cinta dan kasih sayangnya yang tiada batas dan tak terbalaskan, serta doa restunya.
6. Sahabat-sahabat terbaikku Velin, Mbak Naura, Mbak Mega, Alfiana, Menik, dan Astri terima kasih atas bantuan,

- semangat, dan kebersamaan yang tidak akan Penulis lupakan.
7. Abdillah Muharram yang telah memberikan semangat dan dorongan dari jauh selama proses pengerjaan Tugas Akhir ini.
 8. Anak bimbingan Bapak Suwarmin, Yoga, Bagus, dan Mas Sapto yang telah berjuang bersama menyelesaikan Tugas Akhir ini.
 9. Seluruh teman-teman angkatan Lintas Jalur S1 Teknik Mesin – ITS 2016, senang bisa mengenal kalian. *See you on top guys!*
 10. Seluruh dosen dan staf pengajar Jurusan S1 Teknik Mesin FTI - ITS, yang telah memberikan ilmunya dan membantu semua selama menimba ilmu di bangku kuliah.
 11. Semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu-persatu yang telah membantu memberikan dukungan.

Semoga segala keikhlasan dan kebaikan yang telah diberikan mendapatkan balasan yang terbaik dari Tuhan Yang Maha Esa, Aamiin.

Karena keterbatasan waktu dan kemampuan penulis, sebagai manusia biasa kami menyadari dalam penulisan ini masih terdapat beberapa kesalahan, keterbatasan, dan kekurangan. Oleh karena itu, kami mengharap kritik dan saran membangun sebagai masukan untuk penulis dan kesempurnaan Tugas Akhir ini. Semoga dengan penulisan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi semua pihak yang memerlukan, mahasiswa S1 Teknik Mesin FTI-ITS pada khususnya.

Surabaya, 1 Agustus 2018

Penulis

DAFTAR ISI

| | |
|---|-------------|
| HALAMAN JUDUL | i |
| LEMBAR PENGESAHAN | iii |
| ABSTRAK | iv |
| ABSTRACT | vi |
| KATA PENGANTAR | viii |
| DAFTAR ISI | x |
| DAFTAR GAMBAR | xiii |
| DAFTAR TABEL | xv |
| | |
| BAB I PENDAHULUAN | 1 |
| 1.1 Latar Belakang | 1 |
| 1.2 Rumusan Masalah | 2 |
| 1.3 Tujuan Penelitian | 3 |
| 1.4 Manfaat Penelitian | 3 |
| 1.5 Batasan Masalah | 3 |
| 1.6 Sistematika Laporan | 4 |
| | |
| BAB II TINJAUAN PUSTAKA | 5 |
| 2.1 Analisa Kegagalan | 5 |
| 2.2 <i>Stacker/reclaimer</i> | 7 |
| 2.3 <i>Bogie Wheel</i> | 8 |
| 2.4 Bantalan (<i>Bearing</i>) | 10 |
| 2.5 <i>Spherical Roller Bearing</i> | 11 |
| 2.5.1 Karakteristik <i>Spherical Roller Bearing</i> | 13 |
| 2.6 Pembebanan pada <i>Bearing</i> | 15 |
| 2.6.1 <i>Rolling Contact Fatigue</i> | 15 |
| 2.6.2 Umur Bantalan | 17 |
| 2.7 <i>Stress-strength Interference</i> | 18 |
| 2.8 Pelumasan pada <i>Bearing</i> | 20 |

| | |
|---|-----------|
| 2.8.1 <i>Grease Lubrication</i> | 20 |
| 2.8.2 Jenis <i>Grease Lubrication</i> | 21 |
| 2.8.3 Perhitungan Pelumasan | 23 |
| BAB III METODOLOGI | 27 |
| 3.1 Diagram Alir Penelitian | 27 |
| 3.2 Metodologi Penelitian | 29 |
| 3.2.1 Studi Lapangan dan Identifikasi Permasalahan | 30 |
| 3.2.2 Pengumpulan Data Kerusakan | 30 |
| 3.2.3 Studi Literatur | 30 |
| 3.2.4 Findings | 30 |
| 3.2.5 Diagnose | 30 |
| 3.2.6 Analyze | 31 |
| 3.2.6.1 Analisa Pembebanan | 31 |
| 3.2.6.2 Analisa Pelumasan | 31 |
| 3.2.7 Identifikasi Penyebab Kerusakan | 31 |
| 3.2.8 Kesimpulan dan Saran | 31 |
| BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN | 33 |
| 4.1 Informasi <i>Stacker/reclaimer, Bogie Wheel, Spherical Roller Bearing</i> | 33 |
| 4.2 Riwayat dan Data Kerusakan | 34 |
| 4.2.1 Data Kerusakan | 34 |
| 4.2.2 Foto-foto Kerusakan | 37 |
| 4.2.3 Kondisi Aktual Operasional | 38 |
| 4.3 Hipotesa Penyebab Kerusakan | 39 |
| 4.4 Analisa Pembebanan pada <i>Spherical Roller Bearing</i> | 40 |
| 4.4.1 Pembebanan Tiap <i>Bearing</i> | 41 |
| 4.4.2 <i>Contact Fatigue</i> | 50 |
| 4.4.3 Umur <i>Bearing</i> | 55 |
| 4.5 Analisa Pelumasan pada <i>Spherical Roller Bearing</i> | 56 |

| | |
|--|-----------|
| 4.5.1 Pelumasan Kondisi Seharusnya | 56 |
| 4.5.2 Pelumasan Kondisi Aktual | 57 |
| BAB V KESIMPULAN DAN SARAN | 61 |
| 5.1 Kesimpulan | 61 |
| 5.2 Saran | 62 |
| DAFTAR PUSTAKA | 63 |

DAFTAR GAMBAR

| | |
|---|----|
| Gambar 1.1 Grafik jumlah kerusakan <i>bearing</i> pada <i>bogie wheel stacker/reclaimer</i> | 2 |
| Gambar 2.1 <i>Stacker/reclaimer</i> di PLTU Paiton Unit 5 dan 6 | 7 |
| Gambar 2.2 Skema <i>stacker/reclaimer</i> | 8 |
| Gambar 2.3 <i>Bogie wheel stacker/reclaimer</i> | 9 |
| Gambar 2.4 Peredaman ketidakrataan rel oleh <i>bogie wheel</i> | 9 |
| Gambar 2.5 Komponen <i>spherical roller bearing</i> | 11 |
| Gambar 2.6 Fenomena saat terjadi poros yang memiliki sudut dan poros melengkung pada <i>spherical roller bearing</i> .. | 12 |
| Gambar 2.7 Anatomi pecahan pada <i>ball bearing</i> . (a) Perbedaan bentuk dibanding bentuk awal, (b) Bentuk profil dari pecahan <i>ball bearing</i> (W.A. Glaeser, 1996) | 16 |
| Gambar 2.8 Distribusi tegangan pada permukaan saat <i>rolling, sliding</i> , kombinasi keduanya (R. Ahmed, 2002) | 17 |
| Gambar 2.9 Contoh grafik distribusi normal saat kondisi awal material (a), material mengalami penurunan kekuatan (b), material mengalami kegagalan (c) | 19 |
| Gambar 2.10 <i>Single-shield bearing</i> | 22 |
| Gambar 2.11 <i>Double-shield bearing</i> | 22 |
| Gambar 2.12 <i>Open bearing</i> | 23 |
| Gambar 2.13 Tabel untuk pemilihan <i>bearing factor</i> dan <i>load ratio</i> (Katalog SKF) | 24 |
| Gambar 2.14 Diagram untuk mengetahui waktu antar pelumasan (Katalog SKF) | 25 |
| Gambar 3.1 Diagram alir penelitian | 29 |
| Gambar 4.1 Kerusakan <i>bearing</i> | 38 |
| Gambar 4.2 <i>Stacker/reclaimer</i> dan beban yang terjadi | 42 |
| Gambar 4.3 <i>Free body diagram boom</i> | 43 |
| Gambar 4.4 Sumbu y <i>free body diagram boom</i> | 44 |

| | |
|--|----|
| Gambar 4.5 Sumbu x <i>free body diagram boom</i> | 44 |
| Gambar 4.6 Kaki <i>stacker/reclaimer</i> | 46 |
| Gambar 4.7 Posisi kaki <i>stacker/reclaimer</i> | 47 |
| Gambar 4.8 <i>Free body diagram</i> kaki <i>stacker/reclaimer</i> | 47 |
| Gambar 4.9 Fluktuasi beban kerja vs kekuatan material | 49 |
| Gambar 4.10 Distribusi normal beban kerja vs kekuatan material | 49 |
| Gambar 4.11 Fluktuasi beban <i>contact fatigue</i> vs kekuatan material | 55 |
| Gambar 4.12 Distribusi normal <i>contact fatigue</i> vs kekuatan material | 55 |

DAFTAR TABEL

| | |
|--|----|
| Tabel 2.1 Permasalahan dalam kegagalan komponen mesin | 5 |
| Tabel 2.2 Kasus kegagalan material akibat perawatan komponen mesin | 6 |
| Tabel 2.3 Penyebab kegagalan dalam komponen mesin | 7 |
| Tabel 2.4 Spesifikasi <i>bogie wheel</i> | 10 |
| Tabel 2.5 <i>Perbandingan jenis bantalan dengan beban yang diterima</i> | 11 |
| Tabel 2.6 Karakteristik <i>spherical roller bearing (Hamrock and Anderson, 1983)</i> | 13 |
| Tabel 2.7 Standar <i>double-row, spherical roller bearing (Hamrock and Anderson, 1983)</i> | 14 |
| Tabel 2.8 Seri dan tipe <i>spherical roller bearing (Hamrock and Anderson, 1983)</i> | 15 |
| Tabel 4.1 Data kerusakan <i>spherical roller bearing</i> | 34 |
| Tabel 4.2 Spesifikasi yang terdapat pada <i>stacker/reclaimer</i> | 41 |
| Tabel 4.3 Spesifikasi pelumas distributor ZP-A | 58 |
| Tabel 4.4 Spesifikasi pelumas distributor VZ-4 | 59 |

BAB I

PENDAHULUAN

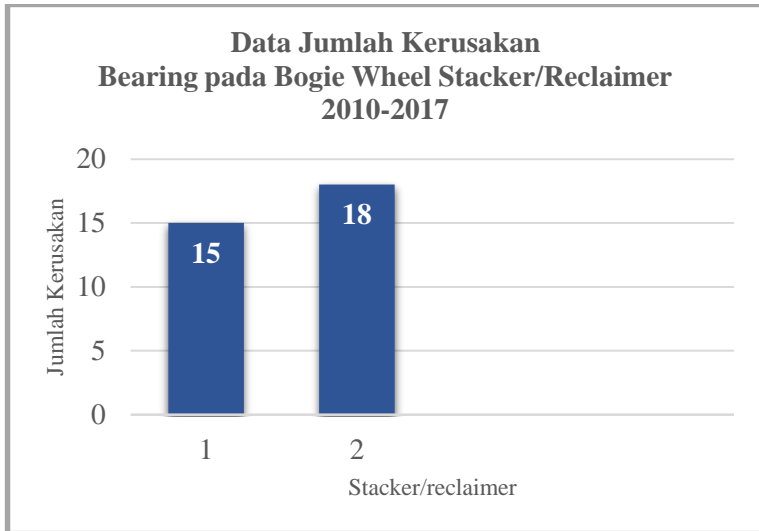
1.1 Latar Belakang

Pembangkitan daya untuk *power plant* terdapat suatu proses berupa *coal handling system*, yaitu suplai batu bara dari kapal tongkang ataupun kapal besar hingga sampai *coal bunker* dimana terdapat banyak proses dan peralatan yang terjadi pada sistem tersebut. Salah satu peralatan yang digunakan pada *coal handling system* yaitu *stacker/reclaimer*. Pada *stacker/reclaimer* terdapat dua proses yaitu *stacking* dan *reclaiming*. *Stacking* yaitu memindahkan batu bara dari *ship unloader* ke *stock pile* sedangkan *reclaiming* yaitu memindahkan batu bara dari *stock pile* hingga *coal bunker*. Peranan *stacker/reclaimer* dapat dikatakan krusial pada *coal handling system* dikarenakan apabila terjadi kerusakan total maka akan menghambat pemindahan batu bara dari kapal yang akan mengakibatkan *charge* apabila kapal terlalu lama bersandar di *jetty* dan dapat menghentikan proses pembangkitan daya dikarenakan tidak adanya batu bara pada *coal bunker* yang akan mengakibatkan kerugian pada perusahaan.

Untuk menunjang operasinya suatu *power plant* selalu melakukan aktifitas *maintenance* secara terjadwal ataupun tidak terjadwal pada proses produksinya dengan tujuan untuk memaksimalkan performa mesin agar dapat beroperasi dengan optimal. Salah satu unit kerja di *power plant* yang bertugas melakukan *maintenance* adalah *Material Handling Department*. Pada hakikatnya pemeliharaan sangat dibutuhkan untuk mengatasi berbagai masalah yang sering terjadi terutama pada mesin-mesin yang beroperasi secara kontinu. Adanya strategi pemeliharaan yang baik maka akan meningkatkan keandalan dari komponen atau mesin yang dimiliki oleh perusahaan.

Menurut data dari *power plant* pada tahun 2010-2017, *wheel* pada *stacker/reclaimer* cukup banyak mengalami kerusakan meskipun tidak sampai mengganggu proses pembangkitan daya.

Data frekuensi kerusakan periode 2010-2017 dapat dilihat pada gambar 1.1.



Gambar 1.1 Grafik jumlah kerusakan *bearing* pada *bogie wheel stacker/reclaimer*

Hipotesa awal, kemungkinan terjadinya kerusakan *bearing* pada *wheel stacker/reclaimer* dikarenakan oleh pembebanan yang berlebih pada masing-masing *bearing* yang tidak sesuai dengan beban maksimal yang dapat diterima oleh *bearing*, sistem pelumasan yang tidak sesuai, dan prosedur pemasangan pada *bearing*. Maka dari itu, dilakukanlah analisa terhadap kegagalan ini untuk membuktikan hipotesa awal tersebut, dan untuk menanggulangi hal tersebut, maka dilakukan analisa kegagalan terhadap *bearing* pada *wheel stacker/reclaimer* agar kegagalan ini tidak terjadi lagi.

1.2 Rumusan Masalah

Rumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Faktor apa yang menyebabkan kegagalan *spherical roller bearing* pada *bogie wheel stacker/reclaimer*?
2. Bagaimana mekanisme kegagalan pada komponen *spherical roller bearing* pada *bogie wheel stacker/reclaimer*?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan dalam penelitian ini adalah:

1. Menganalisa faktor penyebab terjadinya kegagalan *spherical roller bearing* pada *bogie wheel stacker/reclaimer*.
2. Menganalisa mekanisme kegagalan pada komponen *spherical roller bearing* pada *bogie wheel stacker/reclaimer*.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat dalam penelitian ini adalah:

1. Bagi perusahaan, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi acuan penanganan apabila terjadi kegagalan yang sama dikemudian hari, dari segi penyebab kegagalan maupun solusi yang ditawarkan.
2. Bagi peneliti, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi dasar pengembangan pada ilmu pengetahuan berikutnya.

1.5 Batasan Masalah

Agar penelitian ini menjadi terarah dan memberikan kejelasan analisis permasalahan, maka dilakukan pembatasan permasalahan sebagai berikut:

1. Desain dan spesifikasi *spherical roller bearing* pada *bogie wheel stacker/reclaimer* memenuhi standard operasional.
2. Proses operasional sesuai dengan standard prosedur.
3. Data yang digunakan adalah historis kerusakan *wheel stacker/reclaimer* pada tahun 2010 hingga 2017.
4. Sistem yang diteliti adalah *stacker/reclaimer* di *power plant*.

1.6 Sistematika Laporan

Laporan penelitian ini akan disusun secara sistematis dibagi dalam beberapa bab, dengan rincian sebagai berikut:

BAB I PENDAHULUAN

Bab ini berisikan penjelasan latar belakang, rumusan masalah, tujuan, manfaat penelitian, batasan masalah, dan sistematika laporan.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisikan teori-teori dan fakta-fakta yang digunakan sebagai dasar untuk melakukan rujukan dan pembahasan permasalahan yang diangkat pada Tugas Akhir ini.

BAB III METODOLOGI

Bab ini akan dijelaskan mengenai proses dari penelitian serta analisa data meliputi cara pengambilan data dan pengolahan data.

BAB IV ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi analisa kegagalan dari *spherical roller bearing* pada *bogie wheel stacker/reclaimer* dari hasil pengolahan data yang telah diambil.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini berisi tentang kesimpulan dari keseluruhan hasil penelitian dan saran yang dapat dijadikan perbaikan dan pengembangan untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Analisa Kegagalan

Analisa kegagalan dapat diartikan sebagai pemeriksaan/pengujian terhadap komponen-komponen atau struktur yang mengalami kerusakan beserta kondisi yang menyebabkan kegagalan dengan tujuan untuk mengetahui penyebab dari kegagalan tersebut.

Disimpulkan bahwa, analisa kegagalan berujung pada observasi pada komponen-komponen yang rusak. Pengamatan pola patahan yang rusak adalah kunci bagi seluruh proses analisa kegagalan, oleh sebab itu pengamatan secara makrokopis dan mikrokopis harus dilaksanakan secara bertahap. Pengujian mekanik diperlukan karena secara umum kegagalan disebabkan oleh gaya-gaya yang bekerja dari lingkungan kerja komponen.

Menurut sumber-sumber penelitian yang ada di dunia industri (Brooks,2002), faktor penyebab kegagalan yang sering terjadi di dunia industri dapat dikarenakan :

1. Faktor kesalahan pemilihan material

Hasil penelitian mengenai faktor kegagalan material yang dominan yaitu faktor kesalahan dalam memilih material. Tabel 2.1 di bawah ini menunjukkan statistik tentang permasalahan dalam kasus kegagalan material.

| <i>Tabel 2.1</i> Permasalahan dalam kegagalan komponen mesin | |
|--|----------|
| Permasalahan | % |
| Kesalahan pemilihan material | 38 |
| Cacat produksi | 15 |
| Kesalahan perlakuan panas | 15 |
| Kesalahan desain mekanik | 11 |
| Kondisi operasi yang berlebihan | 8 |
| Kondisi lingkungan yang tidak terkontrol | 6 |
| Pemeriksaan yang kurang baik | 5 |
| Material yang tidak jelas | 2 |

2. Perawatan komponen yang kurang baik

Proses perawatan komponen mesin yang kurang baik termasuk salah satu penyebab kegagalan yang paling dominan. Tabel 2.2 menunjukkan data mengenai kasus kegagalan material yang terjadi.

Tabel 2.2 Kasus kegagalan material akibat perawatan komponen mesin

| Permasalahan | % |
|----------------------------|----------|
| Perawatan yang kurang baik | 44 |
| Cacat saat fabrikasi | 17 |
| Defisiensi desain | 16 |
| Pemakaian yang abnormal | 10 |
| Cacat material | 7 |
| Penyebab yang tidak jelas | 6 |

3. Kesalahan dalam perancangan komponen

Faktor kesalahan dalam proses perancangan komponen mesin adalah sebagai berikut:

- Kegagalan ulet akibat pembebanan yang melebihi kekuatan material.
- Kegagalan getas akibat beban kejut.
- Kegagalan pada temperature tinggi (pemuluran).
- *Static delayed fracture*.
- Proses perancangan yang terlalu banyak memicu konsentrasi tegangan seperti takikan.
- Analisa tegangan komponen yang kurang detail yang menyebabkan rawan terjadi kegagalan akibat *overload*.
- Kesalahan dalam menentukan material dari komponen mesin sehingga mempengaruhi hitungan yang dilakukan.

4. Kondisi kerja yang ekstrim

Permasalahan yang spesifik dalam kegagalan komponen mesin akibat kondisi kerja yang ekstrim disajikan dalam Tabel 2.3.

Tabel 2.3 Penyebab kegagalan dalam komponen mesin

| Penyebab Kegagalan | % |
|---|----|
| Korosi | 29 |
| Kelelahan (<i>fatigue</i>) | 25 |
| Kegagalan getas (<i>brittle fracture</i>) | 16 |
| Kelebihan beban | 11 |
| Korosi temperatur tinggi | 7 |
| Korosi retak tegang, korosi lelah, penggetasan hydrogen | 6 |
| Pemuluran (<i>creep</i>) | 3 |
| Abrasi, erosi | 3 |

2.2 *Stacker/reclaimer*

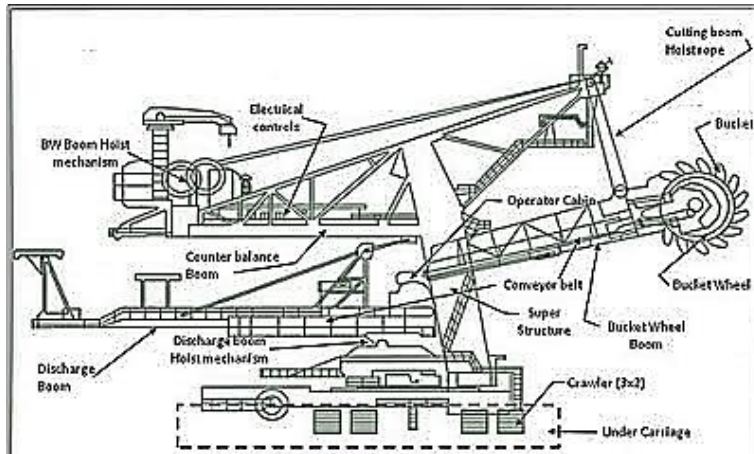
Stacker/reclaimer merupakan peralatan yang dimiliki oleh *power plant* untuk melakukan proses *stacking* dan *reclaiming*. Proses *stacking* yaitu pemindahan batu bara dari konveyor menuju ke *stock pile*, sedangkan proses *reclaiming* yaitu pemindahan batu bara dari *stock pile* menuju ke *coal bunker*.

Gambar 2.1 *Stacker/reclaimer* di PLTU Paiton Unit 5 dan 6

Stacker/reclaimer pada *power plant* mampu memindahkan 1000 ton per jam batubara. Batu bara tersebut dipindahkan menuju *plant* yang masing-masing memiliki kapasitas 640 MW.

Stacker/reclaimer menggunakan sistem penggerak hidrolis dan motor listrik. Penggerak hidrolis digunakan untuk *stacker/reclaimer* bergerak maju mundur dan berputar, sedangkan

penggerak motor listrik digunakan untuk memutar alat pengeruknya.



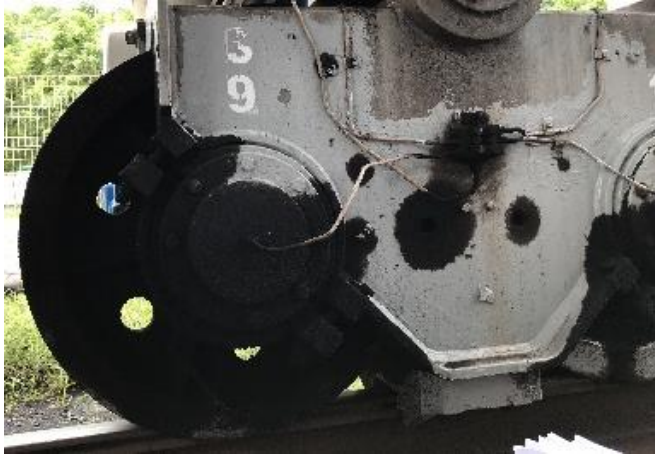
Gambar 2.2 Skema stacker/reclaimer

Stacker/reclaimer terdiri dari suatu *bucket wheel* yang ditempatkan pada ujung/akhir dari *slewing* dan *bucket wheel boom* yang terpasang pada suatu *reversible boom conveyor*. Komponen-komponen tersebut di atas dimuatkan pada suatu *mobile gantry* yang akan bergerak secara paralel ke *stock pile*. *Mobile gantry* bergerak sepanjang jalur rel yang dipasang di area penimbunan. Batu bara yang dikeruk kemudian dibawa ke *belt conveyor* untuk dilakukan proses *conveying* yang menuju *power plant*. Pada *stock pile* terdapat 2 buah *stacker/reclaimer*.

2.3 Bogie Wheel

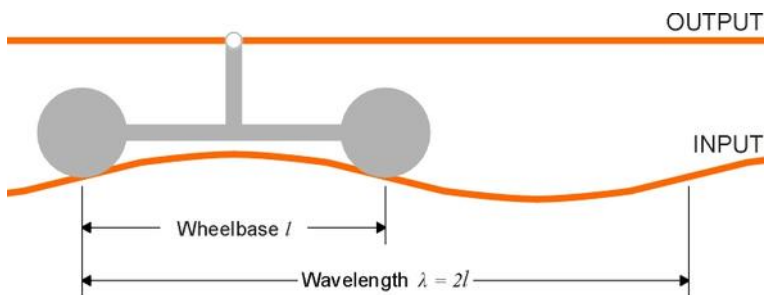
Bogie wheel merupakan sistem kesatuan roda pada *stacker/reclaimer* yang terdiri dari dua perangkat roda atau lebih yang digabungkan oleh rangka yang dilengkapi dengan sistem pemegasan, pengereman, dengan atau tanpa peralatan penggerak (traksi motor atau *gear box*) dan *slip protection device*, serta berfungsi sebagai pendukung rangka dasar dari badan

stacker/reclaimer. *Bogie wheel* dapat dilepas dan dipasangkan kembali jika sedang dilakukan perawatan.



Gambar 2.3 *Bogie wheel stacker/reclaimer*

Bogie wheel dapat meredam efek yang diakibatkan oleh rel yang bergelombang naik turun. Bodi *stacker/reclaimer* akan tertumpu pada titik tengah *bogie wheel* sehingga akan membagi defleksi yang terjadi diantara 2 rodanya. Hal ini akan menyebabkan *stacker/reclaimer* lebih stabil walau rel tidak rata / bergelombang naik turun.



Gambar 2.4 Peredaman ketidakrataan rel oleh *bogie wheel*

Bogie wheel pada *stacker/reclaimer* milik *power plant* berjumlah 26 buah dengan menggunakan bahan AISI 4140, dengan spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 2.4 Spesifikasi bogie wheel

| | |
|---------------------------------|-------------------------|
| Travelling speed | 24 m/min 0.4 m/s |
| Track wheel diameter | 630 mm |
| Gauge | 6.6 m |
| Travel rail | UIC 60 |
| Length of rail | 355 m |
| Number of non-drive wheel | 9 pcs |
| Number of drive wheel | 9 pcs |
| Extreme wheel load in operation | 269 kN |
| Number of rail clamps | 2 pcs |
| Holding power the rail clamp | 160 kN ($\mu = 0.25$) |
| Driving power per drive | 7.5 kW |
| Drive pier leg | 6 pcs |
| Drive shear leg | 3 pcs |

*UIC (Union Internationale des Chemins de Fer)

2.4 Bantalan (*Bearing*)

Bearing atau bantalan, memiliki arti alat atau tempat yang digunakan untuk menumpu poros benda, berputar sedemikian rupa hingga perputaran poros berjalan lancar. Berdasarkan pengertian tersebut, bantalan digunakan untuk menahan beban yang terjadi akibat dari suatu gerak pada salah satu bagian mesin, dengan kata lain prinsip bantalan adalah menahan beban.

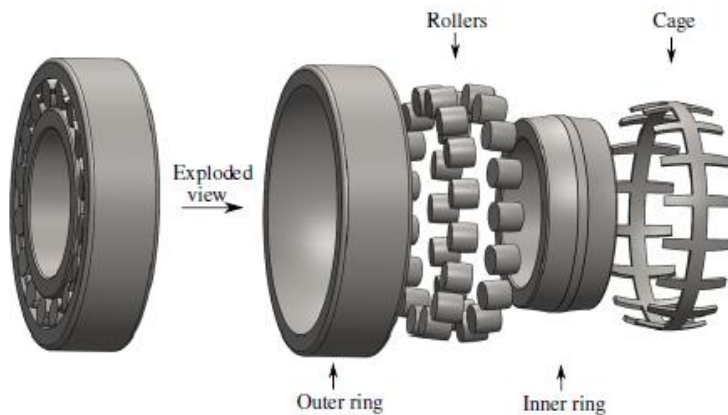
Bantalan digunakan untuk menerima dua buah beban, yaitu beban aksial dan beban radial. Beban radial terjadi terhadap pusat dari bantalan sepanjang jari – jarinya, beban aksial terjadi searah dengan sumbu poros. Beban yang diterima bantalan merupakan salah satu dasar pemilihan jenis bantalan.

Tabel 2.5 Perbandingan jenis bantalan dengan beban yang diterima

| Jenis Bantalan | Kemampuan menerima beban radial | Kemampuan menerima beban aksial |
|--------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Cylindrical roller | Sempurna | Buruk |
| Needle roller | Sempurna | Buruk |
| Spherical roller | Sempurna | Cukup/Baik |
| Tapered roller | Sempurna | Sempurna |

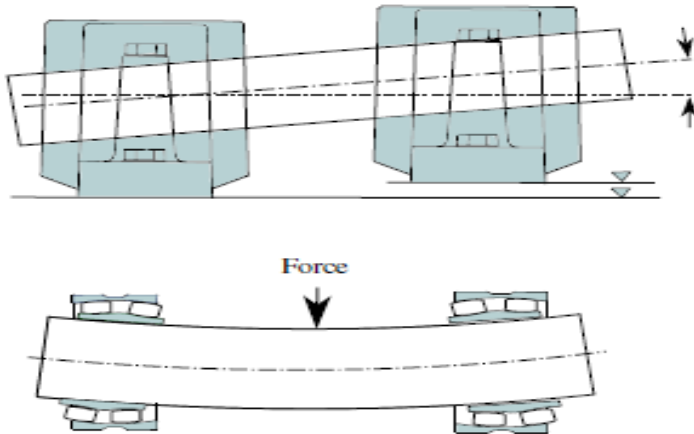
2.5 Spherical Roller Bearing

Pada gambar 4, *spherical roller bearing* mempunyai dua baris *roller*, sebuah *outer ring* berbentuk sebuah *spherical raceway*, dan sebuah *inner ring* berbentuk dua *spherical raceway* yang tegak lurus dengan sumbu *bearing*, dan sebuah *cage*. Pada *spherical roller bearing*, bagian *inner ring* dikunci pada *outer ring* sehingga hanya dapat bergerak arah aksial. *Spherical roller bearing* memiliki *roller* sebanyak dua baris maka memiliki kemampuan untuk membawa beban yang besar, gaya aksial di kedua arah, dan gaya radial yang besar, sehingga *bearing* ini banyak digunakan untuk aplikasi industri berat.



Gambar 2.5 Komponen *spherical roller bearing*

Spherical roller bearing memiliki *roller* dan *spherical raceways* yang simetris, maka *bearing* ini dapat digunakan pada poros yang memiliki sudut dan bila terjadi lengkungan tidak meningkatkan gesekan dan mengurangi waktu penggunaan *bearing*.







Gambar 2.6 Fenomena saat terjadi poros yang memiliki sudut dan poros melengkung pada *spherical roller bearing*

Spherical roller bearing digunakan pada banyak aplikasi yang memungkinkan untuk poros berotasi dan membutuhkan *alignment* untuk membawa beban yang besar, putaran rendah, dan gesekan rendah.

Pada *wheel stacker/reclaimer* milik *power plant* menggunakan *spherical roller bearing* seri SKF 22222 E sebanyak 26 buah sesuai dengan jumlah dari *bogie wheel*.


2.5.1 Karakteristik Spherical Roller Bearings

Tabel 2.6 Karakteristik *spherical roller bearing*
(Hamrock and Anderson, 1983)

| Tipe | Ukuran bor, mm | | Kapasitas relatif, kN | | Batas kecepatan, r/min | Toleransi mis- alignment |
|---|-------------------|------|--|--|------------------------------|--------------------------------|
| | Min | Max | Radial | Thrust | | |
| Single row, barrel or convex  | 20 | 320 | 2.10 | 0.20 | 0.50 | $\pm 2^\circ$ |
| Double row, barrel or convex  | 25 | 1250 | 2.40 | 0.70 | 0.50 | $\pm 1^\circ 30'$ |
| Thrust  | 85 | 360 | 0.10 ^a 0.10 ^b | 1.80 ^a 2.40 ^b | 0.35-0.50 | $\pm 3^\circ$ |
| Double row, concave  | 50 | 130 | 2.40 | 0.70 | 0.50 | $\pm 1^\circ 30'$ |

^asymmetric rollers, ^basymmetric rollers

*Tabel 2.7 Standar double-row, spherical roller bearing
(Hamrock and Anderson, 1983)*

| Tipe | Desain roller | Desain penahan | Penuntun roller | Kontak roller race |
|---|----------------------|------------------------------------|------------------------------|--|
| SLB  | Simetris | Pemesinan, roller sebagai penuntun | Pemandu diberi sekat | Garis modifikasi, diantara race |
| SC  | Simetris | Pengecapan, race sebagai penuntun | Cincin pemandu mengambang | Garis modifikasi, diantara race |
| SD  | Asimetris | Pemesinan, race sebagai penuntun | Inner-ring di tengah bingkai | Kontak garis, outer; point kontak, inner |

*Tabel 2.8 Seri dan tipe spherical roller bearing
(Hamrock and Anderson, 1983)*

| Seri | Tipe | Ukuran bor, mm | | Kapasitas relatif ^a , kN | | Faktor batas kecepatan, r/min |
|---------|-------------------|-------------------|------|--|--------|--|
| | | Min | Max | Radial | Thrust | |
| 202 | Single-row barrel | 20 | 320 | 1.0 | 0.11 | 0.5 |
| 203 | Single-row barrel | 20 | 240 | 1.7 | .18 | .5 |
| 204 | Single-row barrel | 25 | 110 | 2.1 | .22 | .4 |
| 212 | SLB | 35 | 75 | 1.0 | .26 | .6 |
| 213 | SLB | 30 | 70 | 1.7 | .53 | .6 |
| 22, 22K | SLB, SC, SD | 30 | 320 | 1.7 | .46 | .6 |
| 23, 23K | SLB, SC, SD | 40 | 280 | 2.7 | 1.0 | .6 |
| 30, 30K | SLB, SC, SD | 120 | 1250 | 1.2 | .29 | .7 |
| 31, 31K | SLB, SC, SD | 110 | 1250 | 1.7 | .54 | .6 |
| 32, 32K | SLB, SC, SD | 100 | 850 | 2.1 | .78 | .6 |
| 39, 39K | SD | 120 | 1250 | .7 | .18 | .7 |
| 40, 40K | SD | 180 | 250 | 1.5 | --- | .7 |

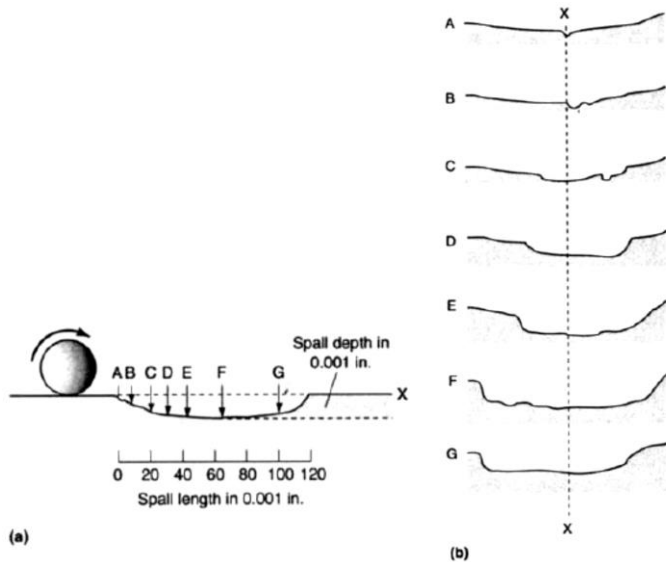
^aKapasitas pembebanan berdasarkan beberapa jenis dari spherical roller bearing. Untuk beberapa ukuran, spherical roller bearing mempunyai kapasitas pembebanan radial sama dengan cylindrical roller bearing.

2.6 Pembebanan pada Bearing

2.6.1 Rolling Contact Fatigue

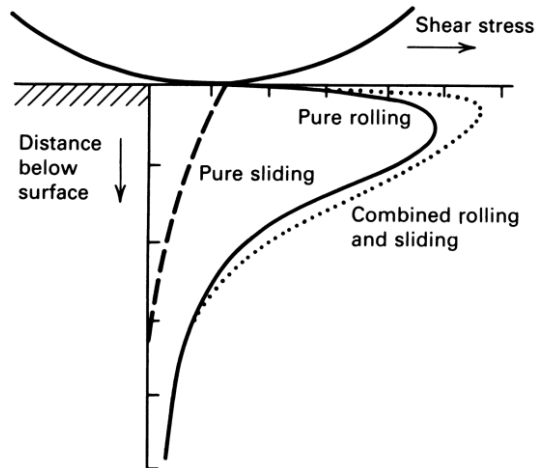
Rolling contact fatigue dapat didefinisikan sebagai mekanisme perambatan retak yang disebabkan oleh tegangan yang terjadi pada permukaan karena terjadi *rolling*. Hal ini dapat menyebabkan hilangnya material seperti pengelupasan, korosi,

retak, hingga kegagalan material. *Rolling contact fatigue* berbeda tidak seperti teori keausan pada umumnya karena didasarkan pada beban siklik saat kondisi *rolling* maupun *sliding* dikondisi *asperity level*.



Gambar 2.7 Anatomi pecahan pada *ball bearing*. (a) Perbedaan bentuk dibanding bentuk awal, (b) Bentuk profil dari pecahan *ball bearing* (W.A. Glaeser, 1996)

Mekanisme dari *contact fatigue* yaitu disebabkan oleh tegangan yang dihasilkan oleh kontak yang bergulir dan terkonsentrasi di suatu titik yang menyebabkan regangan plastik. Regangan ini akan terakumulasi karena beban yang sama dibebankan pada suatu titik tersebut hingga mulai terjadi retak dan akan terbentuk pecahan. *Contact fatigue* dapat disebabkan oleh kondisi geometri dari permukaan dan sedikit pengaruh dari panas, kondisi lingkungan, dan material pembentuk yang heterogen. Analisa tegangan *Hertz* mengasumsikan bentuk *circular*, *elliptical*, dan garis akan menyebabkan tekanan maksimum jika terjadi kontak dengan permukaan melengkung.



Gambar 2.8 Distribusi tegangan pada permukaan saat *rolling*, *sliding*, dan kombinasi keduanya (R. Ahmed, 2002)

Bantalan yang dipakai merupakan *spherical roller bearing* dan terjadi kontak dengan *outer* dan *inner ring* maka rumus yang digunakan untuk mencari besar *contact fatigue*, yaitu:

$$F_r = \frac{n \cdot F_{max}}{Z} \dots\dots\dots (2.1)$$

Keterangan:

- F_r = gaya dari *contact fatigue* (kN)
- n = jumlah *rolling element* tiap baris (buah)
- F_{max} = gaya yang diterima *bearing* (kN)
- Z = jumlah *rolling element* yang mengalami *contact fatigue* (buah)

2.6.2 Umur Bantalan

Untuk menghitung umur bantalan dapat menggunakan rumus berikut:

$$L = \left(\frac{C}{P}\right)^b \times \left(\frac{1000000}{(60 \times n)}\right) \dots \dots \dots (2.2)$$

Keterangan:

L = umur bantalan (jam)

C = beban dinamis yang diterima bantalan

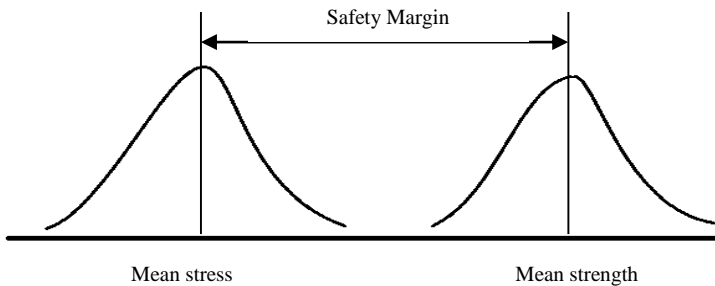
P = beban ekuivalen bantalan

b = koefisien kontak (3 untuk bentuk ellips, 10/3 untuk bentuk persegi panjang)

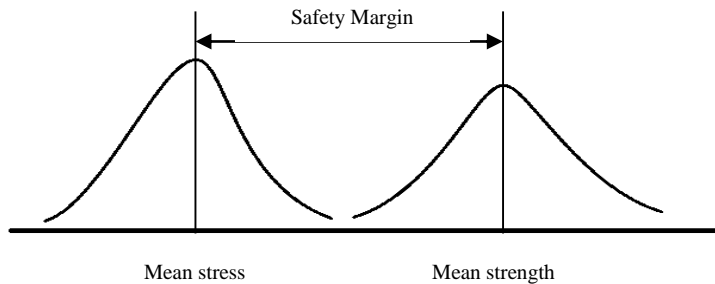
n = putaran (rpm)

2.7 Stress-strength Interference

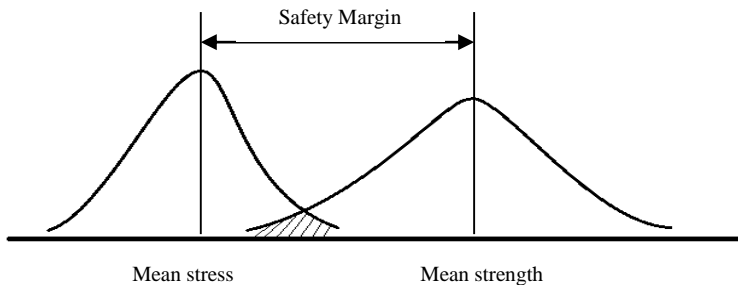
Metode stress-strength interference dapat digunakan untuk mengidentifikasi kegagalan komponen. Tegangan yang diterima saat beroperasi dan kekuatan material dipresentasikan dalam distribusi acak yang didefinisikan oleh probability density functions (PDF). Gambar 2.9 menunjukkan contoh grafik distribusi normal tegangan dan kekuatan.



(a)



(b)



(c)

Gambar 2.9 Contoh Grafik Distribusi Normal Saat Kondisi Awal Material (a), Material Mengalami Penurunan Kekuatan (b), Material Mengalami Kegagalan (c)

Gambar 2.9(a) menunjukkan kondisi awal material, terlihat bahwa jarak antara grafik tegangan operasi dan kekuatan material jauh dan tidak berpotongan, pada kondisi ini material aman untuk digunakan. Gambar 2.9(b) menunjukkan bahwa material mengalami penurunan kekuatan karena pemakaian, namun belum terjadi perpotongan antara grafik tegangan operasi dan kekuatan material. Gambar 2.9(c) menunjukkan bahwa grafik tegangan operasi telah berpotongan dengan grafik kekuatan material, perpotongan kurva tegangan yang diterima dan kekuatan

material membentuk suatu luasan yang disebut *area of interference*. *Area of interference* menunjukkan probabilitas kegagalan suatu komponen. Semakin besar *area of interference*, probabilitas kegagalan komponen semakin besar, sehingga tidak aman untuk digunakan,

2.8 Pelumasan pada *Bearing*

Karena fungsinya yang krusial, *bearing* membutuhkan perawatan yang baik sehingga didapatkan umur kerja yang panjang. Salah satu bentuk perawatan *bearing* yang utama adalah lubrikasi atau pelumasan. Berikut adalah fungsi lubrikasi pada *bearing*:

1. Membentuk lapisan film lubrikasi diantara dua bidang kontak sehingga dapat membantu menahan beban kerja serta mencegah keausan dan kerusakan prematur.
2. Menyerap panas yang timbul.
3. Mencegah kontaminasi kotoran-kotoran yang berasal dari luar.
4. Menghindari suara bising.
5. Mencegah korosi pada *bearing*.
6. Sebagai sistem *sealing* tambahan.

2.8.1 *Grease Lubrication*

Grease adalah zat *lubricant* yang berstruktur semi-solid. *Grease* dibuat dari minyak mineral atau juga nabati yang dicampur dengan zat pengental sejenis sabun. Terkadang ditambahkan pula dengan zat aditive seperti PTFE, grafit, dan molibdenum desulfat, untuk memperbaiki sifat-sifat pelumasnya.

Grease digunakan pada mekanisme *bearing* yang hanya membutuhkan sedikit lubrikasi, dimana tidak perlu menggunakan oli sebagai *lubricant*. Ia juga berfungsi untuk mencegah masuknya kotoran-kotoran masuk ke *bearing*. Sisi negatif dari penggunaan *grease* adalah gesekan pada bearing yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan penggunaan oli, hal ini disebabkan karena nilai viskositasnya yang tinggi.

Berikut adalah beberapa jenis *grease bearing* yang diklasifikasikan berdasarkan jenis bahan dasar serta fungsinya:

1. ***Mineral Grease***

Jenis ini menggunakan bahan dasar utama dari mineral minyak bumi, yang dikentalkan oleh bahan sabun. Tipe ini biasa digunakan pada *bearing-bearing* mesin industri. Dapat bekerja pada temperatur tinggi, terutama yang berbahan dasar sintetis.

2. ***Silicone Grease***

Tipe ini menggunakan bahan pengental silika yang tidak akan membentuk struktur kristal di dalamnya. *Grease* tipe ini tidak akan merusak *seal* yang terbuat dari karet karena bahan dasarnya yang tidak menggunakan minyak bumi.

3. ***Food-Grade Grease***

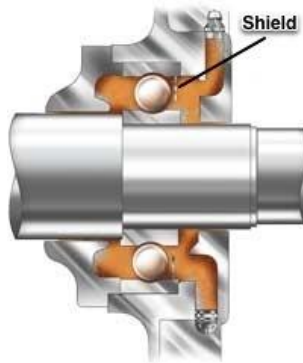
Grease jenis ini menggunakan bahan dasar minyak nabati. Ia digunakan sebagai pelumas pada *bearing-bearing* mesin yang melakukan kontak langsung dengan makanan. Industri manufaktur yang memproduksi makanan pasti menggunakan pelumas jenis ini pada mesinnya.

2.8.2 Jenis *Grease Lubrication*

Penggunaan *grease* pada *bearing* dapat diklasifikasikan berdasarkan desain *bearing* tersebut menjadi tiga, yaitu:

1. ***Single-shield bearing***

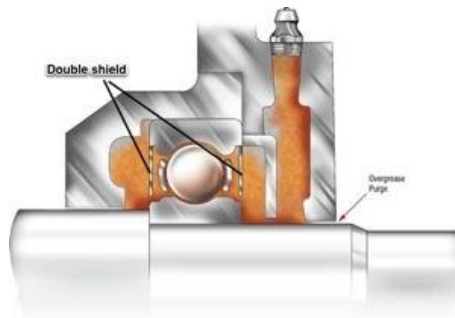
Tipe ini menggunakan sebuah *bearing* yang memiliki desain khusus dimana pada salah satu sisinya dibuat sebuah dinding tipis (*shield*). Dinding ini berfungsi untuk menjaga agar kotoran yang tercampur dengan *grease* di luar dinding tidak masuk ke sisi *roller*. Desain ini akan lebih memperpanjang usia bearing karena kotoran tidak akan secara mudah masuk ke sisi *roller*.



Gambar 2.10 Single-shield bearing

2. Double-shield Bearing

Sama dengan tipe sebelumnya, hanya saja kali ini terdapat dua dinding tipis di kedua sisi *roller*. Dengan desain ini akan didapatkan perlindungan yang lebih maksimal terhadap *roller*. Sirkulasi *grease* terjadi dengan perlahan pada saat mesin berputar dan menciptakan gaya sentrifugal pada *bearing* tersebut.

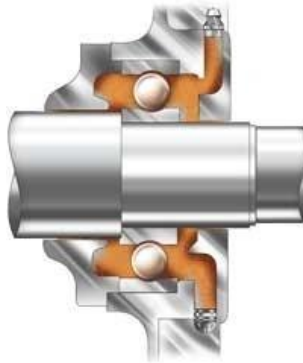


Gambar 2.11 Double-shield bearing

3. Open Bearing

Berbeda dengan dua tipe sebelumnya, tipe ini tidak menggunakan dinding (*shield*) untuk melindungi *roller*.

Namun jenis ini adalah yang paling cocok digunakan untuk mesin dengan beban kerja yang tinggi, sehingga membutuhkan sirkulasi *grease* lebih besar untuk kebutuhan pendinginan.



Gambar 2.12 Open bearing

2.8.3 Perhitungan Pelumasan

Untuk mengetahui pelumasan yang digunakan pada *bearing* telah sesuai atau tidak dengan spesifikasi dan keadaan di lapangan, dilakukan perhitungan yang meliputi jarak antar pemberian pelumasan dan jumlah pelumasan yang dibutuhkan. Perhitungan pelumasan berdasarkan pada katalog SKF sebagaimana *bearing* yang digunakan pada *power plant* merupakan SKF 22222 E.

1. Waktu Pelumasan

Untuk menghitung jarak antar pelumasan dapat dilakukan dengan menggunakan rumus sebagai berikut:

- Faktor kecepatan (*speed factor*)

$$\begin{aligned} \text{Speed factor} &= A \cdot b_f \\ &= n \cdot d_m \cdot b_f \dots \dots \dots (2.3) \end{aligned}$$

Keterangan:

n = kecepatan rotasi (r/min)

d_m = diameter rata-rata bearing (mm)

$= 0,5 (d + D)$

b_f = bearing factor (tabel)

- Rasio beban (*load ratio*)

$$\text{Load ratio} = C/P \dots\dots\dots (2.4)$$

Keterangan:

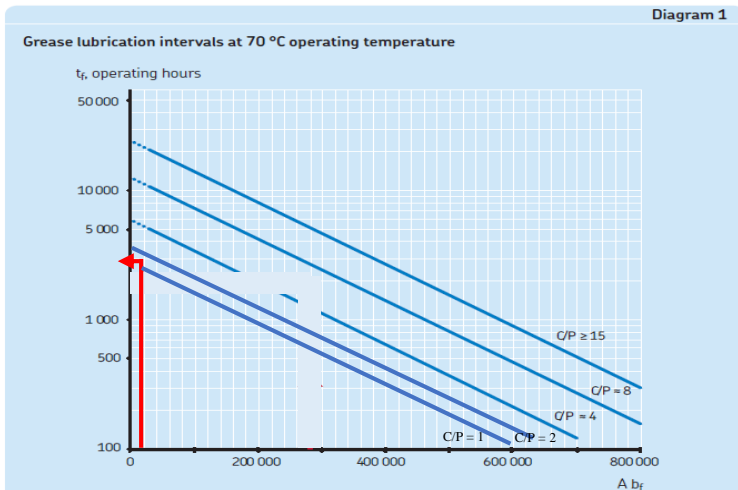
C = beban dinamis bearing (kN)

P = beban dinamis ekuivalen bearing (kN)

| Table 2 | | | | |
|--|-------------------------|---|----------------------|----------------------|
| Bearing factor b_f and recommended limits for the speed factor A | | | | |
| Load ratio F_a/F_r (Bearing series) | Bearing factor b_f | Recommended limits for the speed factor A for load ratio | | |
| — | — | $C/P \geq 15$ | $C/P \approx 8$ | $C/P \approx 4$ |
| mm/min | | | | |
| $F_a/F_r \leq e$ and $d_m \leq 800$ mm | | | | |
| 213, 222, 238, 239 series | 2 | 350 000 | 200 000 | 100 000 |
| 223, 230, 231, 232, 240, 248, 249 series | 2 | 250 000 | 150 000 | 80 000 |
| 241 series | 2 | 150 000 | 80 000 ¹⁾ | 50 000 ¹⁾ |
| $F_a/F_r \leq e$ and $d_m > 800$ mm | | | | |
| 238, 239 series | 2 | 230 000 | 130 000 | 65 000 |
| 230, 231, 240, 248, 249 series | 2 | 170 000 | 100 000 | 50 000 |
| 241 series | 2 | 100 000 | 50 000 ¹⁾ | 30 000 ¹⁾ |
| $F_a/F_r > e$ | | | | |
| all series | 6 | 150 000 | 50 000 ¹⁾ | 30 000 ¹⁾ |

¹⁾ For higher speeds oil lubrication is recommended

Gambar 2.13 Tabel untuk pemilihan bearing factor dan load ratio (Katalog SKF)



Gambar 2.14 Diagram untuk mengetahui waktu antar pelumasan (Katalog SKF)

2. Jumlah Pelumasan

Pelumasan yang digunakan pada *power plant* berupa pelumasan secara otomatis sehingga untuk menghitung jumlah pelumasan:

$$G_k = (0,3 \dots 0,5) D B \times 10^{-4} \dots \dots \dots (2.5)$$

Keterangan:

G_k = jumlah grease yang dibutuhkan (g/h)

D = diameter luar bearing (mm)

B = tebal total bearing (mm)

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB III

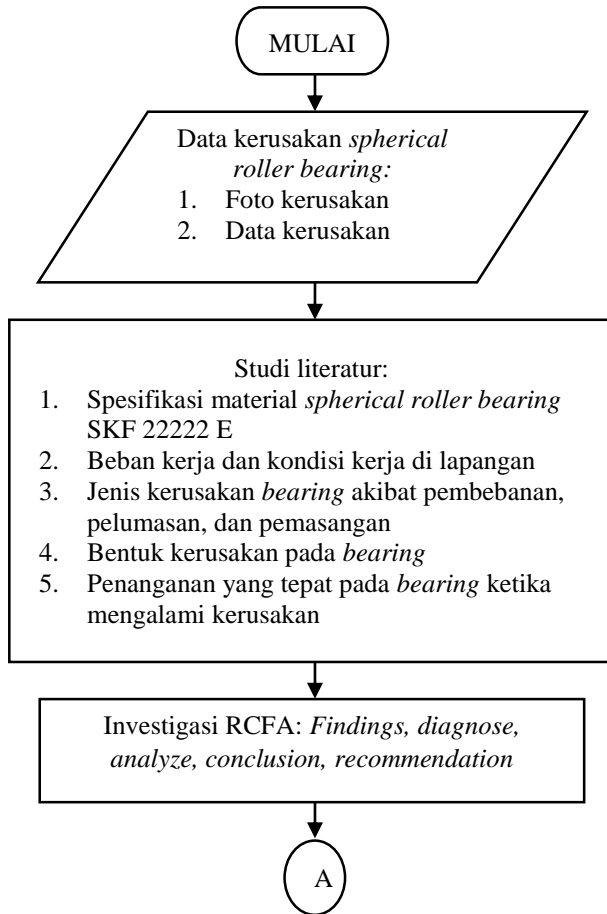
METODOLOGI PENELITIAN

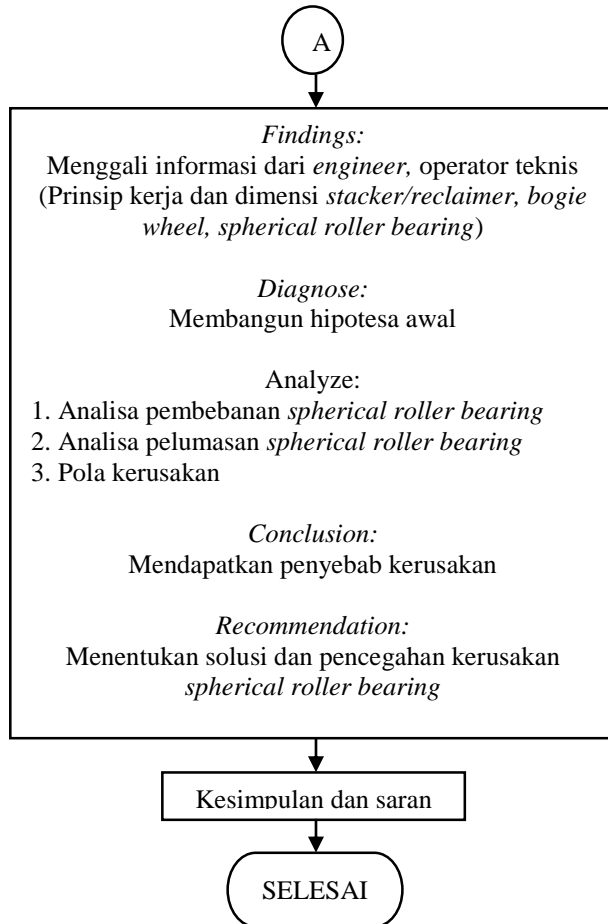
Setelah melakukan tinjauan pustaka dari bab 2, maka selanjutnya membuat metodologi penelitian yang dipakai sebagai acuan pengerjaan dalam penelitian tugas akhir.

Pada bab ini akan dijelaskan langkah-langkah metodologi penelitian sebagai acuan penyelesaian kasus yang dibahas pada tugas akhir ini. Langkah-langkah tersebut dibagi dalam enam tahap, yaitu tahap studi lapangan dan identifikasi permasalahan, pengumpulan data historis, studi literatur, melakukan pengamatan makroskopis, analisa perhitungan, dan memberikan alternatif penyelesaian.

3.1 Diagram Alir Penelitian

Alur penelitian bertujuan untuk membuat penelitian lebih terstruktur dan sistematis. Dalam sub bab ini akan dibahas bagaimana urutan langkah penelitian serta metode-metode yang dipergunakan selama penelitian. Diawali dari tahap investigasi lapangan hingga didapatkan sebuah hasil yaitu rekomendasi yang tepat untuk mengantisipasi kerusakan yang sama di masa yang akan datang. Lebih jelasnya dapat dilihat pada penjelasan di bawah ini:





Gambar 3.1 Diagram alir penelitian

3.2 Metodologi Penelitian

Diagram alir penelitian pada gambar 3.1 dapat dijelaskan lebih lanjut secara mendalam dengan beberapa sub-bab berikut:

3.2.1 Studi Lapangan dan Identifikasi Permasalahan

Pada tahap studi lapangan, dilakukan pengamatan terhadap beberapa peralatan pada pembangkit yang sedang dalam kondisi *breakdown*, ataupun merupakan komponen kritis dari pembangkit. Terdapat beberapa pilihan peralatan yang sering mengalami kerusakan, namun *bogie wheel* pada *stacker/reclaimer* memiliki permasalahan yang lebih kompleks akibat kegagalan *bearing* dan merupakan salah satu peralatan kritis yang ada di pabrik. Tahap ini meliputi mempelajari secara detail desain *stacker/reclaimer* dan *bogie wheel*, serta pengamatan visual dari kerusakan *bogie wheel* yang ada yakni pada rusaknya *bearing*.

3.2.2 Pengumpulan Data Kerusakan

Data kerusakan dikumpulkan, dimulai dari *record* kerusakan, *work order* yang dilakukan oleh pihak mekanik, spesifikasi *bogie wheel*, spesifikasi bahan komponen *bogie wheel*. Dari data historis, dapat dilihat kerusakan apa saja yang pernah terjadi pada *bogie wheel* selama beroperasi.

3.2.3 Studi Literatur

Studi literatur merupakan tahap mempelajari referensi-referensi yang ada, baik *handbook* maupun jurnal. Studi literatur berguna untuk mendukung penulis melakukan analisa kerusakan yang terjadi serta mengetahui penelitian-penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh peneliti lain.

3.2.4 Findings

Merupakan tahapan yang dilakukan untuk menggali informasi dari *engineer* maupun operator teknis di lapangan mengenai prinsip kerja dan dimensi dari *stacker/reclaimer*, *bogie wheel*, dan *spherical roller bearing*.

3.2.5 Diagnose

Tahap ini berguna untuk melakukan hipotesa awal mengenai kemungkinan yang menjadi penyebab dari kerusakan *spherical roller bearing* berdasarkan data dan informasi yang telah didapat.

3.2.6 Analyze

Penulis melakukan tahap analisis yaitu *hypothesis testing* dan *root cause identification* untuk mengidentifikasi akar masalah dan menganalisa hipotesis awal. Tahapan yang dilakukan akan dijelaskan pada sub-bab berikut:

3.2.6.1 Analisa Pembebanan

Melakukan analisa pembebanan antara beban yang dapat diterima oleh *bearing* dengan beban kerja di lapangan dengan menggunakan metode *rolling contact fatigue*.

3.2.6.2 Analisa Pelumasan

Melakukan analisa sistem pelumasan yang digunakan pada *bearing* apakah telah sesuai dengan kondisi di lapangan.

3.2.7 Identifikasi Penyebab Kerusakan

Pembahasan yang dilakukan berdasarkan analisa yang telah dilakukan nantinya akan menjawab permasalahan yang telah dikemukakan pada perumusan masalah yaitu:

1. Menganalisa faktor yang menjadi penyebab kegagalan *spherical roller bearing* pada *bogie wheel stacker/reclaimer*.
2. Mengatahui mekanisme kegagalan pada komponen *spherical roller bearing* pada *bogie wheel stacker/reclaimer* dan mendapatkan langkah penanggulangan.

3.2.8 Kesimpulan dan Saran

Tahap ini merupakan tahap akhir dari penelitian Tugas Akhir. Analisa yang telah dilakukan akan dapat menjelaskan penyebab terjadinya kerusakan *bearing* berdasarkan data yang telah dilakukan perhitungan dan pembahasan. Berdasarkan data tersebut pula akan diperoleh solusi yang dapat dijadikan sebagai kesimpulan agar dapat dijadikan pertimbangan untuk pihak *power plant* dalam mrngatasi kasus kerusakan *bearing*, sehingga diharapkan tidak terjadi lagi.

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB IV

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

Bab ini akan membahas mengenai penyebab kegagalan yang memicu terjadinya kerusakan *spherical roller bearing* pada *bogie wheel stacker/reclaimer* di suatu *power plant*. Analisa penyebab kerusakan dilakukan dengan mengacu pada data kerusakan, foto kerusakan, kondisi operasional, dan informasi penunjang lainnya yang didapatkan dari pihak *power plant*. Setelah itu dilakukan hipotesis dan pengolahan data dengan analisa perhitungan yang meliputi perhitungan pembebanan, pelumasan, serta mengamati prosedur pemasangan *bearing* untuk mengetahui penyebab kegagalan dari *spherical roller bearing* pada *bogie wheel stacker/reclaimer*.

4.1 Informasi Stacker/reclaimer, Bogie Wheel, Spherical Roller Bearing

Stacker/reclaimer pada suatu *power plant* berfungsi untuk memindahkan batubara sebanyak 1031,8 ton/jam dan memiliki dua fungsi yaitu *stacking* dan *reclaiming*, pada proses *stacking* yaitu memindahkan batubara dari konveyor yang berasal *ship unloader* menuju ke *stockpile*, sedangkan proses *reclaiming* yaitu memindahkan batubara dari *stockpile* menuju ke *coal bunker* pada setiap *plant*. Saat proses *stacking*, *bucket* pada *stacker/reclaimer* akan terisi batubara dari konveyor dan berjalan sepanjang rel untuk meletakkan batubara di *stockpile*. Sedangkan saat proses *reclaiming*, *bucket* pada *stacker/reclaimer* akan mengeruk batubara di *stockpile*.

Saat melakukan proses-proses tersebut, *stacker/reclaimer* dilengkapi oleh *bogie wheel* sebagai pendukung rangka dasar dari badan *stacker/reclaimer* yang memiliki berat 892 ton untuk berat kosong dan dengan kecepatan 6 rpm. Jumlah *bogie wheel* yang dimiliki oleh *stacker/reclaimer* sebanyak 26 buah. Setiap *bogie wheel* memiliki *bearing* yang berjenis *spherical roller bearing* seri SKF 22222 E sebanyak 26 buah pula.

4.2 Riwayat dan Data Kerusakan

Data yang didapat dari suatu *power plant* akan menjadi acuan dasar atau referensi dalam mengidentifikasi kerusakan *spherical roller bearing* pada *bogie wheel stacker/reclaimer* adalah sebagai berikut:

- a. Data kerusakan
- b. Foto-foto kerusakan
- c. Kondisi aktual operasional

4.2.1 Data Kerusakan

Di bawah ini adalah tabel dari data kerusakan *spherical roller bearing* pada *bogie wheel stacker/reclaimer* pada tahun 2010-2017 untuk *stacker/reclaimer* 1 dan 2 yang didapat dari suatu *power plant*.

Tabel 4.1 Data kerusakan *spherical roller bearing*

| Stacker/reclaimer 1 | | | | | |
|----------------------------|--------------------------|-----------------|--------------------|--------------------------------------|-----------|
| No | Data Kerusakan | Tanggal Laporan | Tanggal Pengerjaan | Penanganan | Eksekutor |
| 1. | Gantry wheel bearing S6 | 21/01/2011 | 27/01/2011 | Penggantian gantry wheel bearing S6 | Mekanik |
| 2. | Bogie wheel bearing | 21/05/2012 | 30/05/2012 | Penggantian bogie wheel bearing | Mekanik |
| 3. | Gantry wheel bearing U13 | 2/05/2013 | 3/05/2013 | Penggantian gantry wheel bearing U13 | Mekanik |
| 4. | Gantry wheel bearing S6 | 3/07/2014 | 5/07/2014 | Penggantian gantry wheel bearing S6 | Mekanik |
| 5. | Gantry wheel bearing U11 | 30/09/2014 | 2/10/2014 | Penggantian gantry wheel bearing U11 | Mekanik |
| 6. | Gantry wheel bearing U7 | 19/11/2014 | 20/11/2014 | Penggantian gantry wheel bearing U7 | Mekanik |

| | | | | | |
|----------------------------|--------------------------|------------|------------|--------------------------------------|---------|
| 7. | Gantry wheel bearing S2 | 23/11/2015 | 24/11/2015 | Penggantian gantry wheel bearing S2 | Mekanik |
| 8. | Bogie wheel bearing U15 | 3/01/2016 | 7/01/2016 | Penggantian bogie wheel bearing U15 | Mekanik |
| 9. | Gantry wheel bearing U13 | 2/05/2016 | 3/05/2016 | Penggantian gantry wheel bearing U13 | Mekanik |
| 10. | Bogie wheel bearing U4 | 14/06/2016 | 15/06/2016 | Penggantian bogie wheel bearing U4 | Mekanik |
| 11. | Gantry wheel bearing U9 | 5/07/2016 | 25/07/2016 | Penggantian gantry wheel bearing U9 | Mekanik |
| 12. | Gantry wheel bearing U12 | 23/08/2016 | 25/08/2016 | Penggantian gantry wheel bearing U12 | Mekanik |
| 13. | Gantry wheel bearing U10 | 11/09/2016 | 13/09/2016 | Penggantian gantry wheel bearing U10 | Mekanik |
| 14. | Gantry wheel bearing S8 | 14/06/2017 | 16/06/2017 | Penggantian gantry wheel bearing S8 | Mekanik |
| 15. | Gantry wheel bearing U2 | 31/10/2017 | 1/11/2017 | Penggantian gantry wheel bearing U2 | Mekanik |
| Stacker/reclaimer 2 | | | | | |
| 1. | Gantry wheel bearing S3 | 10/01/2013 | 17/01/2013 | Penggantian gantry wheel bearing S3 | Mekanik |
| 2. | Gantry wheel bearing S8 | 15/03/2013 | 25/03/2013 | Penggantian gantry wheel bearing S8 | Mekanik |
| 3. | Gantry wheel bearing U11 | 17/04/2013 | 17/04/2013 | Penggantian gantry wheel bearing U11 | Mekanik |

| | | | | | |
|-----|--------------------------|------------|------------|--------------------------------------|---------|
| 4. | Gantry wheel bearing U16 | 10/06/2013 | 11/06/2013 | Penggantian gantry wheel bearing U16 | Mekanik |
| 5. | Gantry wheel bearing S2 | 5/09/2013 | 6/09/2013 | Penggantian gantry wheel bearing S2 | Mekanik |
| 6. | Gantry wheel bearing U14 | 1/10/2013 | 2/10/2013 | Penggantian gantry wheel bearing U14 | Mekanik |
| 7. | Gantry wheel bearing U8 | 27/11/2014 | 28/11/2014 | Penggantian gantry wheel bearing U8 | Mekanik |
| 8. | Gantry wheel bearing U7 | 24/12/2014 | 5/01/2015 | Penggantian gantry wheel bearing U7 | Mekanik |
| 9. | Gantry wheel bearing S6 | 28/01/2015 | 30/01/2015 | Penggantian gantry wheel bearing S6 | Mekanik |
| 10. | Gantry wheel bearing U2 | 10/03/2015 | 11/03/2015 | Penggantian gantry wheel bearing U2 | Mekanik |
| 11. | Gantry wheel bearing U9 | 25/03/2015 | 30/03/2015 | Penggantian gantry wheel bearing U9 | Mekanik |
| 12. | Gantry wheel bearing S10 | 29/12/2015 | 30/12/2015 | Penggantian gantry wheel bearing S10 | Mekanik |
| 13. | Gantry wheel bearing U6 | 28/03/2016 | 29/03/2016 | Penggantian gantry wheel bearing U6 | Mekanik |
| 14. | Gantry wheel bearing S5 | 23/05/2016 | 1/06/2016 | Penggantian gantry wheel bearing S5 | Mekanik |
| 15. | Gantry wheel bearing U15 | 26/08/2016 | 31/08/2016 | Penggantian gantry wheel bearing U15 | Mekanik |

| | | | | | |
|-----|--------------------------|------------|------------|--------------------------------------|---------|
| 16. | Gantry wheel bearing U1 | 7/10/2016 | 26/10/2016 | Penggantian gantry wheel bearing U1 | Mekanik |
| 17. | Gantry wheel bearing U10 | 29/11/2016 | 29/11/2016 | Penggantian gantry wheel bearing U10 | Mekanik |
| 18. | Gantry wheel bearing S7 | 24/11/2017 | 5/12/2017 | Penggantian gantry wheel bearing S7 | Mekanik |

Dari tabel 4.1 diketahui bahwa kerusakan yang terjadi pada *spherical roller bearing* bergantian letaknya di utara maupun selatan baik di *stacker/reclaimer* 1 dan 2 dengan jumlah kerusakan rata-rata 17 kerusakan dalam rentang tahun 2010-2017. Rusaknya *bearing* menyebabkan terganggunya proses pemindahan batubara dikarenakan dilakukan mengganti *bearing* yang rusak dengan yang baru.

4.2.2 Foto-foto Kerusakan

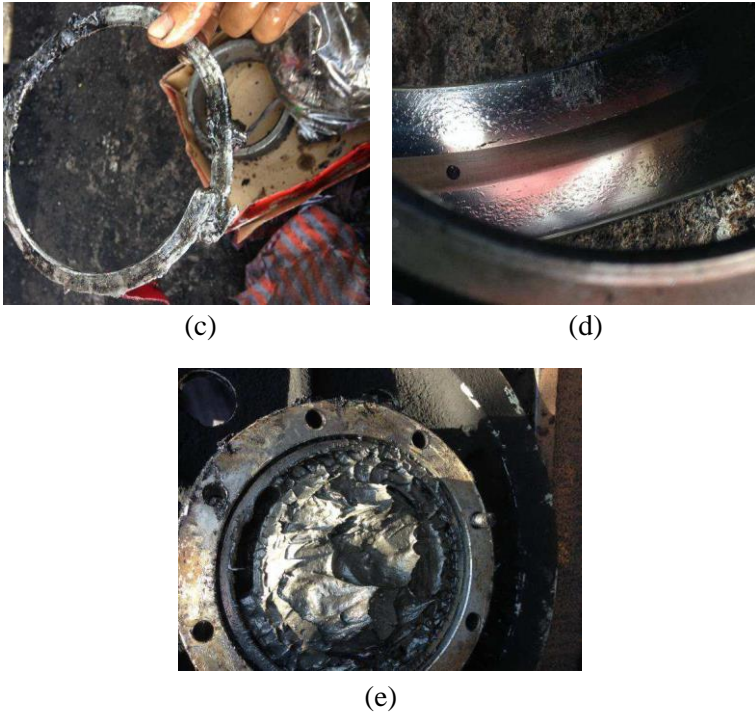
Gambar 4.1 di bawah ini adalah foto-foto kerusakan *spherical roller bearing* yang didapat dari *power plant*.



(a)



(b)



Gambar 4.1 Kerusakan *bearing* akibat, (a) Keausan, (b) Korosi, (c) Retak, (d) Pengelupasan, (e) Pengotoran

Gambar 4.1 menunjukkan kerusakan-kerusakan yang terjadi pada *spherical roller bearing* di bagian *outer ring*, *inner ring*, dan *cage* yang disebabkan oleh banyak faktor seperti keausan, korosi, retak, pengelupasan, dan pengotoran.

4.2.3 Kondisi Aktual Operasional

Data kondisi aktual yang diperoleh dari *power plant* adalah sebagai berikut:

1. Bagian yang rusak pada *bearing* terjadi pada *outer ring*, *inner ring*, dan *cage*. Kerusakan *bearing* dapat menyebabkan rusaknya *wheel* sehingga saat mengganti *bearing* otomatis mengganti *wheel*.
2. Kondisi operasi saat *stacker/reclaimer* bekerja yaitu pada kecepatan 6 rpm, membawa batubara sebanyak 500 ton/jam saat proses *reclaiming*, berat kosong *stacker/reclaimer* 600 ton, ditumpu oleh 26 *bogie wheel* dengan 1 buah *spherical roller bearing* pada setiap *wheel*.
3. Pada saat *bearing* rusak dan dilakukan penggantian *bearing*, *stacker/reclaimer* yang sedang dalam perbaikan berhenti operasi dan digantikan kerjanya oleh *stacker/reclaimer* yang lain. *Bearing* diganti dengan tipe dan seri yang sama yaitu SKF 22222 E.

4.3 Hipotesis Penyebab Kerusakan

Bearing pada *bogie wheel* merupakan elemen penting pada *stacker/reclaimer* karena jika *bearing* rusak maka *stacker/reclaimer* tidak dapat beroperasi dan mengganggu proses pembangkitan daya.

Berdasarkan studi literatur yang dilakukan, terdapat beberapa faktor yang dapat menjadi penyebab kerusakan pada *spherical roller bearing*, antara lain:

1. *Fatigue*

Fatigue atau kelelahan adalah bentuk dari kegagalan yang terjadi pada struktur karena beban dinamik yang berfluktuasi di bawah *yield strength* yang terjadi dalam waktu yang berulang-ulang. Terdapat 3 fase dalam kelelahan yaitu permukaan retak (*initial crack*), penyebaran retak (*crack propagation*), dan patah (*final crack*). Mekanisme dari permulaan umumnya dimulai dari *crack initiation* yang terjadi pada permukaan material yang lemah atau daerah dimana terjadi konsentrasi tegangan.

2. *Overload*

Overload merupakan keadaan ketika beban yang diterima melebihi beban maksimum yang diizinkan atau di atas *yield strength*. Beban yang berlebih akan menimbulkan deformasi pada struktur material dan akan terjadi *fracture* saat mencapai nilai *ultimate strength*.

3. Pelumasan

Pelumasan merupakan faktor yang harus diperhatikan untuk benda yang beroperasi karena dengan tidak sesuainya pelumasan atau kurangnya pelumasan akan menyebabkan timbulnya panas, mengakibatkan goresan akibat gesekan pada permukaan, dan saat keausan berlebih akan menyebabkan keseluruhan *bearing* mengalami kerusakan.

4. Material *Bearing*

Material *bearing* merupakan hal penting yang harus dianalisa karena meskipun menggunakan tipe dan seri *bearing* yang sama, dapat memiliki material pembentuk *bearing* yang berbeda berdasarkan Negara pembuatan *bearing* tersebut.

5. Pemasangan

Pemasangan *bearing* yang salah berupa tidak sesuainya toleransi antara *bearing* dan *shaft*. Apabila toleransi berlebihan, *inner race* akan dipaksa mengembang dan akan terjadi pembengkokan *bearing* yang akan menyebabkan kerusakan.

4.4 Analisa Pembebanan pada *Spherical Roller Bearing*

Berdasarkan kebutuhan batubara yang diperlukan pada *power plant* dan ditinjau dari banyaknya kapal yang datang setiap minggu untuk menyuplai batubara, maka beban yang bekerja pada *spherical roller bearing* dapat dihitung.

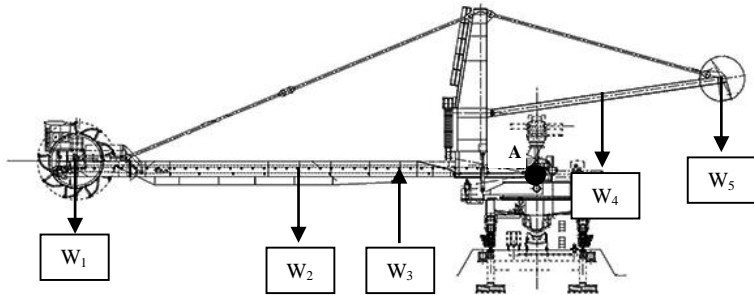
Perhitungan beban pada *spherical roller bearing* diperlukan data berupa beban batubara, beban *stacker/reclaimer*, jarak setiap titik pada *boom*, sudut yang digunakan untuk mengangkat batubara, dan jumlah *bearing*. Data-data tersebut dirangkum pada tabel 4.2 di bawah ini.

Tabel 4.2 Spesifikasi yang Terdapat pada *Stacker/reclaimer*

| Spesifikasi/Tipe/Nilai | |
|--------------------------------|---|
| Kedatangan kapal | Kapal besar : 100.000 ton/minggu Kapal tongkang: 30.000 ton/minggu |
| Pengangkutan batubara | - Reclaiming Tertinggi: 800 ton/jam Terendah: 200 ton/jam Rata-rata: 500 ton/jam - Stacking Rata-rata: 125 ton/jam |
| Beban stacker/reclaimer | <i>Super structure</i> : 470 ton <i>Bucket wheel</i> : 13,53 ton <i>Counterweight</i> : 130 ton <i>Counterweight boom</i> : 6,11 ton <i>Boom</i> : 25,239 ton |
| Jarak di titik boom | Tumpuan – bucket : 30 m Tumpuan – <i>counterweight</i> : 26,6 m Tumpuan – titik berat <i>boom</i> : 15 m Tumpuan – hidraulik : 4,5 m |
| Sudut lengan boom | 45° |
| Jumlah kaki | Ditopang 3 buah kaki |
| Bearing | Tipe : <i>Spherical Roller Bearing</i> Seri : SKF 22222 E <i>Basic dynamic load rating</i> : 572 kN <i>Basic static load rating</i> : 640 kN Jumlah : 26 buah |

4.4.1 Pembebanan Tiap *Bearing*

Gaya yang bekerja pada setiap *bearing* dapat dihitung dengan cara mencari gaya yang terjadi pada tumpuan *boom* terlebih dahulu kemudian ditambah dengan beban *super structure* sehingga didapat beban total. Beban total tersebut nanti akan dikali dengan sudut-sudut yang terdapat pada kaki *stacker/reclaimer* dan dicari gaya yang terbesar. Gambar 4.2 merupakan *stacker/reclaimer* kondisi normal dan beban-beban yang terjadi.



Gambar 4.2 Stacker/reclaimer dan beban yang terjadi

Keterangan:

W_1 : Beban *bucket* dan batubara

W_2 : Beban *boom*

W_3 : Beban hidraulik

W_4 : Beban *boom counterweight*

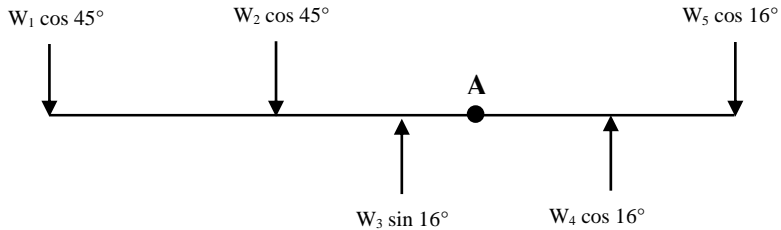
W_5 : Beban *counterweight*

A : Tumpuan pada *slewing bearing*

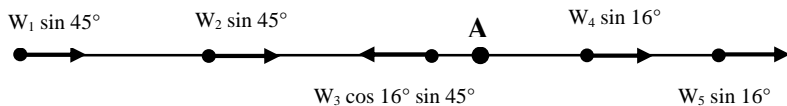
Perhitungan dilakukan saat posisi *boom* keadaan normal tidak membentuk sudut, posisi *boom* membentuk sudut 45° ke atas, dan posisi *boom* membentuk sudut 45° ke bawah.

Akan tetapi perhitungan yang akan dicantumkan yaitu saat *boom* membentuk sudut 45° ke atas karena akan menghasilkan beban tumpuan terbesar. Alasan diambil beban tumpuan terbesar dikarenakan apabila saat beban tumpuan terbesar masih dalam kondisi aman, maka saat beban tumpuan di bawah maksimal maka pasti komponen/sistem akan aman.

Gambar 4.3 merupakan *free body diagram* untuk kondisi boom membentuk sudut 45° ke atas.

Sumbu y*Gambar 4.4 Sumbu y free body diagram boom*

$$\begin{aligned}
 +\curvearrowleft \quad \Sigma F_y &= 0 \\
 W_1 \cos 45 + W_2 \cos 45 - W_3 \sin 16 \cdot \cos 45 + W_4 \cos 16 + \\
 W_5 \cos 16 + A_y &= 0 \\
 1382,8 \text{ kN} (\cos 45) + 159,36 \text{ kN} (\cos 45) - \\
 200 \text{ kN} (\sin 16) \cdot (\cos 45) + 60 \text{ kN} (\cos 16) + \\
 1300 \text{ kN} (\cos 16) + A_y &= 0 \\
 977,787 \text{ kN} + 112,684 \text{ kN} - 38,981 \text{ kN} + 57,675 \text{ kN} \\
 + 1249,640 \text{ kN} + A_y &= 0 \\
 A_y &= -2358,805 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Sumbu x*Gambar 4.5 Sumbu x free body diagram boom*

$$\begin{aligned}
 +\rightarrow \quad \Sigma F_x &= 0 \\
 W_1 \sin 45 + W_2 \sin 45 - W_3 \cos 16 \cdot \sin 45 + W_4 \sin 16 + \\
 W_5 \sin 16 + A_x &= 0
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &1382,8 \text{ kN} (\sin 45) + 159,36 \text{ kN} (\sin 45) - \\
 &200 \text{ kN} (\cos 16) \cdot (\sin 45) + 60 \text{ kN} (\sin 16) + \\
 &1300 \text{ kN} (\sin 16) + A_x = 0 \\
 &977,787 \text{ kN} + 112,684 \text{ kN} - 135,942 \text{ kN} + 16,538 \text{ kN} + \\
 &358,328 \text{ kN} + A_x = 0 \\
 &A_x = -1329,395 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Jadi, } A &= \sqrt{A_x^2 + A_y^2} \\
 &= \sqrt{(-1329,395)^2 + (-2358,805)^2} \\
 &= 2707,6285 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

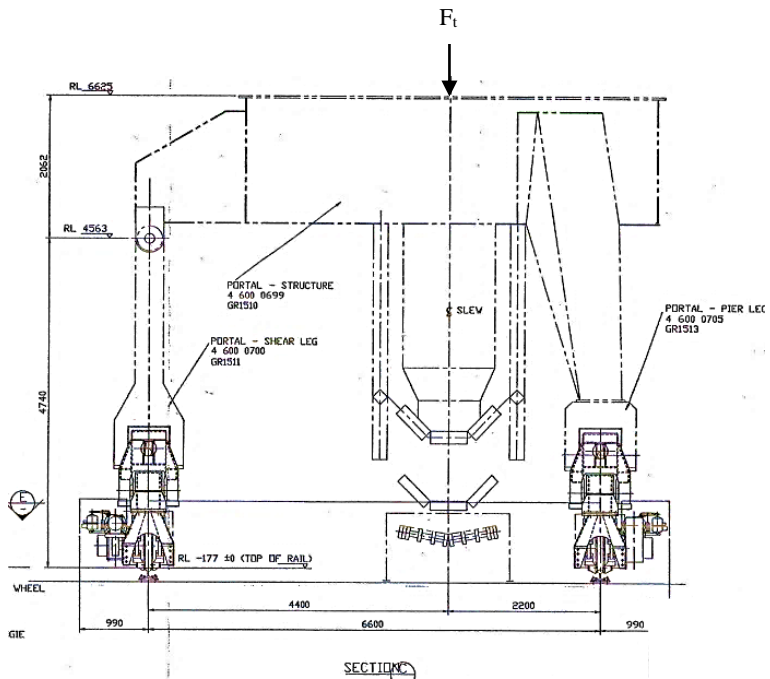
Momen

$$\begin{aligned}
 + \curvearrowright \quad \Sigma M_A &= 0 \\
 -W_1 (30m) \cos 45 - W_2 (15m) \cos 45 + W_3 (4,5m) \sin 16 \cdot \cos 45 + \\
 W_4 (11,231m) \cos 16 + W_5 (22,463m) \cos 16 &= 0 \\
 -1382,8 (30m) \cos 45 - 159,36 (15m) \cos 45 + \\
 200 (4,5m) \sin 16 \cdot \cos 45 + 60 (11,231m) \cos 16 + \\
 1300 (22,463m) \cos 16 &= 0 \\
 -29333,617 - 1690,268 + 175,414 + 647,755 + 1321,592 &= 0 \\
 M_A &= -28879,124 \text{ kNm}
 \end{aligned}$$

Beban total di slewing bearing

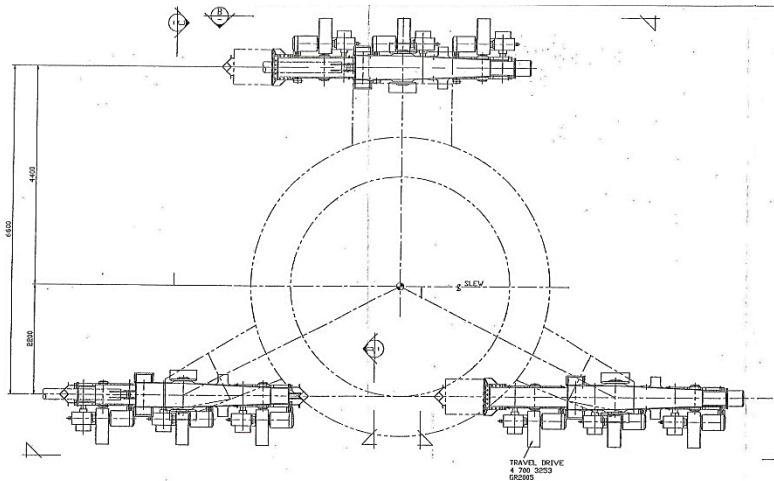
$$\begin{aligned}
 F_t &= A + \text{super structure} \\
 &= 2707,6285 \text{ kN} + 2800 \text{ kN} \\
 &= 5507,6285 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Setelah mengetahui beban total di *slew bearing*, selanjutnya mencari beban yang diterima setiap *bearing* pada *bogie wheel*. Gambar 5.5 merupakan gambar dari kaki *stacker/reclaimer*.

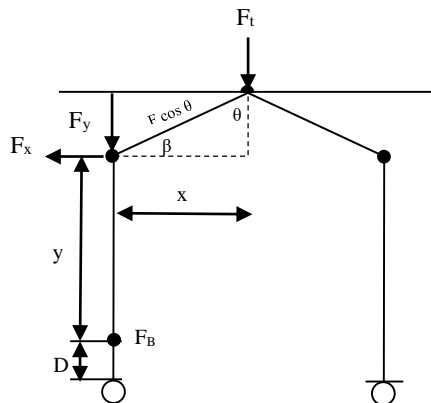


Gambar 4.6 Kaki stacker/reclaimer

Beban F_t dibagi 3 dikarenakan ditumpu oleh 3 kaki sehingga beban masing-masing kaki yaitu 1835,876 kN, kemudian gaya tersebut direaksikan ke arah horizontal dan vertikal. Gambar 5.6 menunjukkan posisi kaki pada stacker/reclaimer.



Gambar 4.7 Posisi kaki stacker/reclaimer



Gambar 4.8 Free body diagram kaki stacker/reclaimer

- Tinjauan horizontal

$$F_x = (F \cos \theta) \cos \beta$$

$$= (1835,876 \text{ kN} \cos 25) \cos 65$$

$$= 703,181 \text{ kN}$$
- Tinjauan vertikal

$$F_y = (F \cos \theta) \sin \beta$$

$$= (1835,876 \text{ kN} \cos 25) \sin 65$$

$$= 1507,977 \text{ kN}$$

Beban tumpuan kaki

$$\Sigma B = 0$$

$$F_y \cdot x + F_x \cdot y + F_B \cdot D = 0$$

$$1507,977 \text{ kN} (0 \text{ m}) + 703,181 \text{ kN} (3,035 \text{ m}) + F_B (0,605 \text{ m}) = 0$$

$$0 + 2134,154 \text{ kNm} + F_B (0,605 \text{ m}) = 0$$

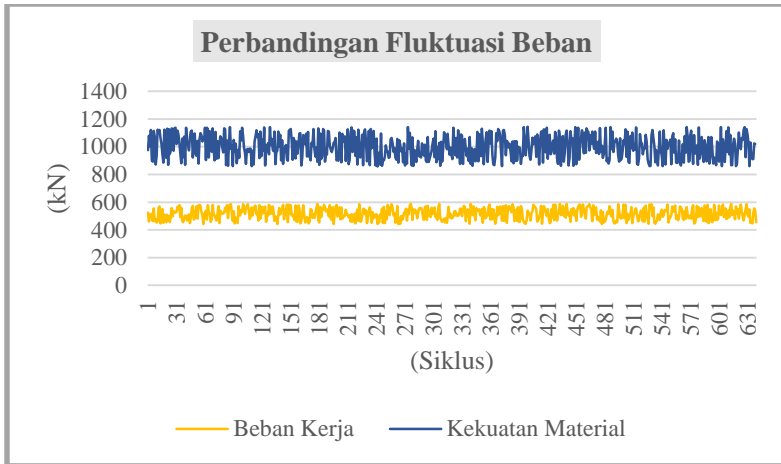
$$F_B (0,605 \text{ m}) = 2134,154 \text{ kNm}$$

$$F_B = 3527,527 \text{ kN}$$

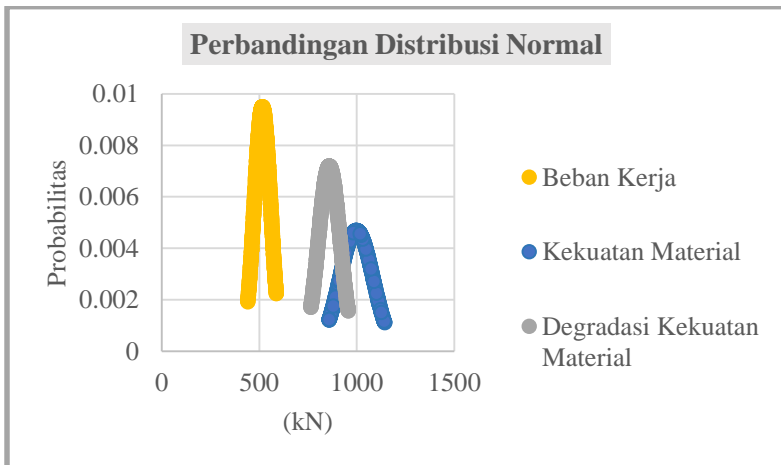
Sehingga, beban tiap *bearing*:

$$\begin{aligned} \text{Beban tiap bearing} &= \frac{F_B}{12} \\ &= \frac{3527,527 \text{ kN}}{12} \\ &= 293,96 \text{ kN} \end{aligned}$$

Setelah besar beban kerja setiap *bearing* diketahui, kemudian dilakukan perhitungan fluktuasi beban dan persebaran distribusi normalnya menggunakan excel dengan menggunakan *safety factor* 1,5 – 2. Nilai dari beban kerja setiap *bearing* dibandingkan dengan nilai dari kekuatan material *bearing*. Gambar 4.5 dan 4.6 merupakan grafik perbandingan antara beban kerja setiap *bearing* dan kekuatan material *bearing* ditinjau dari segi fluktuasi beban dan persebaran distribusi normal.



Gambar 4.9 Fluktuasi beban kerja vs kekuatan material



Gambar 4.10 Distribusi normal beban kerja vs kekuatan material

Komponen dapat dikatakan aman untuk beroperasi apabila beban kerja berada di bawah beban ijin komponen ($S_{\max} \leq S_{\text{ijin}}$). Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, beban kerja yang diterima oleh *bearing* sebesar 293,96 kN sedangkan beban yang

dijinkan sebesar 572 kN sehingga *bearing* dapat dikatakan aman untuk beroperasi.

Grafik distribusi normal menunjukkan bahwa kekuatan material *bearing* lebih besar daripada beban kerja. Grafik distribusi beban kerja tidak berpotongan dengan grafik distribusi kekuatan material *bearing* menunjukkan bahwa *bearing* aman untuk digunakan tanpa ada probabilitas untuk gagal, namun karena *bearing* menerima gaya aksial dan radial secara terus menerus menyebabkan kekuatan dari *bearing* akan berkurang sebagai fungsi waktu. Grafik distribusi kekuatan *bearing* menjadi lebih lebar, sehingga suatu saat grafik distribusi kekuatan material dan beban kerja akan berpotongan. Kemunculan deformasi pada *bearing* akan mempercepat terjadinya perpotongan grafik distribusi beban kerja dan kekuatan *bearing*.

4.4.2 Contact Fatigue

Contact fatigue merupakan beban yang diterima oleh tiap *rolling element bearing*. Setelah mendapatkan beban di tiap kaki maka akan didapat beban di tiap bearing yang dapat digunakan untuk menghitung *contact fatigue*.

| | |
|---------------------------------|---------------|
| <i>Beban tiap kaki</i> | = 3527,527 kN |
| <i>Jumlah bearing total</i> | = 36 buah |
| <i>Jumlah bearing tiap kaki</i> | = 12 buah |
| <i>Jumlah roller</i> | = 18 buah |
| <i>Diameter roller</i> | = 24 mm |

$$\begin{aligned}
 \text{Beban di tiap Bearing} &= \frac{\text{beban tiap kaki}}{\text{jumlah bearing tiap kaki}} \\
 &= \frac{3527,527 \text{ kN}}{12 \text{ buah}} \\
 &= 293,960 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Untuk mencari *contact fatigue* terlebih dahulu harus mencari Z, yaitu jumlah *rolling element* yang terkena *contact fatigue*. Mencari Z melalui beberapa tahapan perhitungan yaitu sebagai berikut:

1. Rasio Radius (α)

- Radius *Roller Bearing* Arah y (r_{ay})

$$\frac{r_{ay}}{d} = 4$$

$$\frac{r_{ay}}{24 \text{ mm}} = 4$$

$$r_{ay} = 96 \text{ mm}$$

- *Race Conformity Ratio Outer* (f_o)

$$\begin{aligned} f_o &= \frac{r_{ay}}{(r_o/2)} \\ &= \frac{96 \text{ mm}}{\left(\frac{100 \text{ mm}}{2}\right)} \\ &= 1,92 \end{aligned}$$

- Radius Efektif Arah y (R_y)

$$\begin{aligned} R_y &= \frac{2 \cdot r_{ay} \cdot f_o}{2 \cdot f_o - 1} \\ &= \frac{2 \cdot 96 \text{ mm} \cdot 1,92}{2 \cdot 1,92 - 1} \\ &= \frac{368,64 \text{ mm}}{2,84} \\ &= 129,8 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Diameter *Pitch* (d_e)

$$\begin{aligned} d_e &= \frac{1}{2}(d_o + d_i) \\ &= \frac{1}{2}(200 + 110) \text{ mm} \\ &= 155 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Celah Diametral (P_d)

$$\begin{aligned} P_d &= d_o - d_i - 2d \\ &= 200 \text{ mm} - 110 \text{ mm} - 2 \cdot 24 \text{ mm} \\ &= 42 \text{ mm} \end{aligned}$$

- Radius Efektif Arah x (R_x)

$$\begin{aligned} R_x &= \frac{d(d_e + d \cos \beta)}{2 \cdot d_e} \\ &= \frac{24 \text{ mm} (155 \text{ mm} + 24 \text{ mm} \cdot \cos 0^\circ)}{2 \cdot 155 \text{ mm}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{4296 \text{ mm}^2}{310 \text{ mm}} \\
 &= 13,858 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Sehingga, } \alpha &= \frac{R_y}{R_x} \\
 &= \frac{129,8 \text{ mm}}{13,858 \text{ mm}} \\
 &= 9,366
 \end{aligned}$$

2. Total Elastic Deformation (δ)

- *Elliptic Integral First Kind (\mathcal{F})*

$$\begin{aligned}
 \mathcal{F} &= \frac{\pi}{2} + q \ln \alpha \\
 &= \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2} - 1 \cdot \ln (9,366) \\
 &= 1,57 + 0,57 \cdot 2,237 \\
 &= 1,57 + 1,275 \\
 &= 2,845
 \end{aligned}$$

- *Elliptic Integral Second Kind (ε)*

$$\begin{aligned}
 \varepsilon &= 1 + q/\alpha \\
 &= 1 + \frac{\pi/2 - 1}{\alpha} \\
 &= 1 + \frac{\pi/2 - 1}{9,366} \\
 &= 1,06
 \end{aligned}$$

- *Curvature Sum (R)*

$$\begin{aligned}
 \frac{1}{R} &= \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_y} \\
 \frac{1}{R} &= \frac{1}{13,858} + \frac{1}{129,8} \\
 \frac{1}{R} &= \frac{1}{129,8 + 13,858} \\
 \frac{1}{R} &= \frac{1}{1798,7684} \\
 R &= 12,521 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

- *Approximate Ellipticity Parameter (κ)*

$$\begin{aligned}
 \kappa &= \alpha^{2/\pi} \\
 &= 9,366^{2/\pi} \\
 &= 4,154
 \end{aligned}$$

- *Effective Elastic Modulus* (N/mm²)

Material 100Cr6

$$E = 190 - 210 \text{ GPa}$$

$$\nu = 0,27 - 0,30$$

$$\begin{aligned} E' &= \frac{2}{\frac{1 - \nu_a^2}{E_a} + \frac{1 - \nu_b^2}{E_b}} \\ &= \frac{2}{\frac{1 - (0,3)^2}{210 \text{ kN/mm}^2} + \frac{1 - (0,3)^2}{210 \text{ kN/mm}^2}} \\ &= \frac{0,0043 + 0,0043}{2} \\ &= 232,558 \text{ kN/mm}^2 \end{aligned}$$

Sehingga,

$$\begin{aligned} \delta &= \mathcal{F} \left[\left(\frac{4,5}{\varepsilon \cdot R} \right) \left(\frac{F}{\pi \cdot \mathcal{K} \cdot E'} \right)^2 \right]^{1/3} \\ &= 2,845 \left[\left(\frac{4,5}{1,06 \cdot 12,521 \text{ mm}} \right) \left(\frac{293,960 \text{ kN}}{\pi \cdot 4,154 \cdot 232,558 \text{ kN/mm}^2} \right)^2 \right]^{1/3} \\ &= 2,845 [0,339 \cdot 0,00938 \text{ mm}]^{1/3} \\ &= 2,845 [0,147 \text{ mm}] \\ &= 0,418 \text{ mm} \end{aligned}$$

3. *Constant Defined* (Z)

$$\begin{aligned} |Z| &= \frac{\pi (1 - P_d/2\delta)^{3/2}}{2,491 \left\{ \left[1 + \left(\frac{1 - P_d/2\delta}{1,23} \right)^2 \right]^{1/2} - 1 \right\}} \\ &= \frac{\pi \left(1 - \frac{42 \text{ mm}}{2 \cdot 0,418 \text{ mm}} \right)^{3/2}}{2,491 \left\{ \left[1 + \left(\frac{1 - \frac{42 \text{ mm}}{2 \cdot 0,418 \text{ mm}}}{1,23} \right)^2 \right]^{1/2} - 1 \right\}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \left| \frac{-1085,459}{97,259} \right| \\
 &= 11,16 \text{ buah} \approx 12 \text{ buah}
 \end{aligned}$$

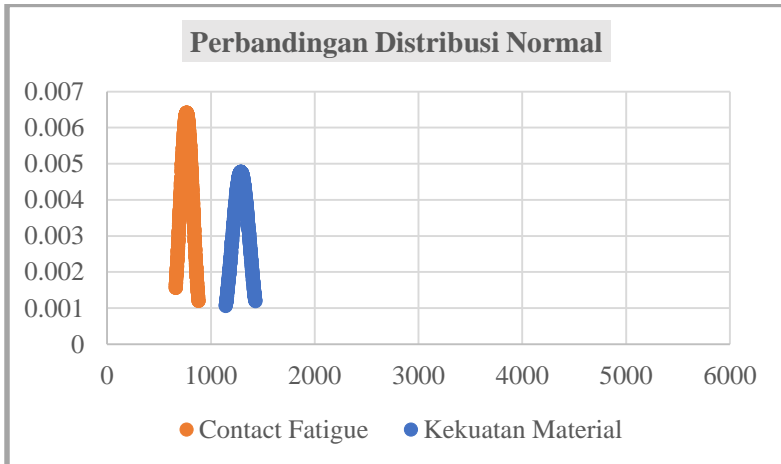
Jumlah *rolling element* yang terkena *contact fatigue* berjumlah 13 buah, maka dapat dicari F untuk *contact fatigue* yaitu:

$$\begin{aligned}
 F_r &= \frac{n \cdot F_{max}}{Z} \\
 &= \frac{18 \text{ buah} \cdot 293,960 \text{ kN}}{12 \text{ buah}} \\
 &= 440,94 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

Besar gaya *contact fatigue* diketahui kemudian dilakukan perhitungan fluktuasi beban dan persebaran distribusi normalnya menggunakan excel dengan mempertimbangkan *safety factor*. Nilai dari *contact fatigue* dibandingkan dengan nilai dari kekuatan material *bearing*. Gambar 4.7 dan 4.8 merupakan grafik perbandingan antara *contact fatigue* dan kekuatan material *bearing* ditinjau dari segi fluktuasi beban dan persebaran distribusi normal.



Gambar 4.11 Fluktuasi beban *contact fatigue* vs kekuatan material



Gambar 4.12 Distribusi normal *contact fatigue* vs kekuatan material

Komponen dapat dikatakan aman untuk beroperasi apabila beban kerja berada di bawah beban ijin komponen ($S_{\max} \leq S_{\text{ijin}}$).

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan, beban *contact fatigue* yang diterima oleh *bearing* sebesar 440,94 kN sedangkan beban yang diijinkan sebesar 572 kN sehingga *bearing* dapat dikatakan aman untuk beroperasi.

Grafik distribusi normal fluktuasi beban dari beban kerja setiap *bearing* dan kekuatan material juga tidak berpotongan dan membentuk *interference region*, hal ini menunjukkan bahwa beban yang diterima *bearing* masih di bawah beban yang dapat diterima oleh *bearing* dan material tidak mengalami kegagalan maupun kegagalan desain.

4.4.3 Umur Bearing

Berikut perhitungan yang digunakan untuk menentukan umur *bearing*:

$$\begin{aligned}
 L_{10}h &= \left(\frac{C}{P}\right)^b \times \left(\frac{1000000}{60 \times n}\right) \\
 &= \left(\frac{572 \text{ kN}}{440,94 \text{ kN}}\right)^b \times \left(\frac{1000000}{60 \times 6 \text{ rpm}}\right) \\
 &= 1,297 \times 2777,7 \text{ jam} \\
 &= 3602,676 \text{ jam} \\
 &= 150 \text{ hari} \approx 5 \text{ bulan}
 \end{aligned}$$

4.5 Analisa Pelumasan pada *Spherical Roller Bearing*

Pelumasan yang digunakan pada *bearing* telah sesuai atau tidak dengan spesifikasi dan keadaan di lapangan dapat diketahui dengan melakukan perhitungan yang meliputi jarak antar pemberian pelumasan dan jumlah pelumasan yang dibutuhkan. Perhitungan pelumasan berdasarkan pada katalog SKF untuk kondisi seharusnya sebagaimana *bearing* yang digunakan pada *power plant* merupakan SKF 22222 E.

$$D = 200 \text{ mm}$$

$$d = 110 \text{ mm}$$

$$d_m = 0,5 (D + d) = 0,5 (200 + 110) \text{ mm} = 155 \text{ mm}$$

$$B = 53 \text{ mm}$$

$$n = 6 \text{ r/min}$$

$$b_f = 2 \text{ (tabel)}$$

$$C = 572 \text{ kN}$$

$$P = 311,703 \text{ kN}$$

4.5.1 Pelumasan Kondisi Seharusnya

1. Waktu Pelumasan

Faktor kecepatan

$$\begin{aligned} \text{Speed factor} &= A \cdot b_f \\ &= n \cdot d_m \cdot b_f \\ &= 6 \text{ r/min} \cdot 155 \text{ mm} \cdot 2 \\ &= 1860 \end{aligned}$$

Rasio beban

$$\begin{aligned} \text{Load ratio} &= C/P \\ &= \frac{572}{311,703} \text{ kN} \\ &= 1,835 \end{aligned}$$

Faktor kecepatan diketahui sebesar 1860 dan rasio beban sebesar 1,835 pada *spherical roller bearing*, maka waktu pelumasan dapat diketahui dari diagram 1 pelumasan katalog SKF (hal. 25) setiap 3000 jam dengan kondisi operasi normal dan di lingkungan yang bersih.

2. Jumlah Pelumasan

$$\begin{aligned} G_k &= (0,3 \dots 0,5) D B \times 10^{-4} \\ &= 0,4 \times 200 \text{ mm} \times 53 \text{ mm} \times 10^{-4} \\ &= 0,42 \text{ gr/h} \\ &= 0,48 \text{ ml/h} \\ &= 11,52 \text{ ml/day} \end{aligned}$$

4.5.2 Pelumasan Kondisi Aktual

Pelumasan yang dilakukan oleh *power plant* menggunakan pelumasan otomatis dengan distributor ZP-A. Berikut data spesifikasi yang didapat:

Tabel 4.3 Spesifikasi pelumas distributor ZP-A

| Distributor Pelumas ZP-A 35541- | |
|--|---|
| Tekanan kerja | Maks. 160 bar |
| Rentang temperatur | -20° sampai +80°C |
| Perbedaan tekanan yang diijinkan diantara 2 keluaran | Maks 50 bar Jika katup searah digunakan, maks tekanan sistem diijinkan |
| Volume pada meteran | 0,07; 0,1; 0,2; 0,3 cm ³ |
| Tekanan buka dari katup searah | 2 bar |
| Tekanan ambil | ≤ 10 bar |
| Volume pelumas | > 0,5 cm ³ /min |
| Pelumas yang digunakan | Grease berbahan minerals oils NLGI-class 2 DIN 51818 |
| Berat | Bergantung jumlah keluaran |

1. Waktu Pelumasan

Rentang waktu pelumasan yang digunakan oleh *power plant* yaitu sekitar setiap 37 menit dengan pelumasan otomatis.

2. Jumlah Pelumasan

Dari katalog ZP-A didapat jumlah pelumasan sebesar 0,3 ml/cycle, sehingga:

$$G_k \text{ (aktual)} = 0,3 \times 24 \\ = 7,2 \text{ ml/day}$$

Berdasarkan perhitungan waktu dan jumlah pelumasan yang kemudian dibandingkan antara kondisi seharusnya dengan kondisi actual didapat kesimpulan bahwa jumlah pelumasan yang digunakan tidak sesuai dengan kondisi seharusnya berdasarkan katalog SKF sehingga *power plant* melakukan penggantian distributor pelumasan menjadi VZ-4 akan tetapi belum semua *bearing* dilakukan penggantian. Berikut spesifikasi dari distributor pelumasan VZ-4:

Tabel 4.4 Spesifikasi pelumas distributor VZ-4

| | |
|--|--------------------------------|
| Distributor Pelumas VZ 2...10 | 35716- |
| Tekanan | 400 bar |
| Tekanan maks | 500 bar |
| Volume keluaran | 0,4...2 cm ³ |
| Rentang temperatur | -30° sampai +80°C |
| Pelumas yang digunakan | 00...3 NLGI-class DIN 51818 |
| Berat | 2,1 kg |

(Halaman ini sengaja dikosongkan)

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

Pada bab ini berisi hasil-hasil pokok Tugas Akhir yang merupakan kesimpulan dan saran yang dapat diberikan.

5.1 Kesimpulan

Kesimpulan dari Tugas Akhir ini adalah:

1. Hasil dari analisa perhitungan pembebanan menunjukkan bahwa beban maksimal saat *bearing* beroperasi berada di bawah beban ijin dari *bearing* ($S_{\max} \leq S_{\text{ijin}}$). Perhitungan pembebanan yang didapat saat *bearing* beroperasi adalah sebesar 293,96 kN sedangkan beban ijin *bearing* sebesar 572 kN.
2. Hasil dari analisa perhitungan pembebanan menunjukkan bahwa beban *contact fatigue* saat *bearing* beroperasi berada di bawah beban ijin dari *bearing* ($S_{\max} \leq S_{\text{ijin}}$). Perhitungan beban *contact fatigue* yang didapat saat *bearing* beroperasi adalah sebesar 440,94 kN sedangkan beban ijin *bearing* sebesar 572 kN.
3. Umur *bearing* yang didapat dari perhitungan yaitu 5 bulan, sedangkan pada kondisi aktual rata-rata umur *bearing* 2 – 3 bulan. Hal ini menunjukkan perbedaan antara umur *bearing* dari perhitungan dengan umur *bearing* aktual.
4. Besar pelumasan yang digunakan kondisi aktual tidak sesuai dengan pelumasan yang seharusnya digunakan. Jumlah pelumasan kondisi aktual sebesar 7,2 ml/day sedangkan pelumasan yang seharusnya digunakan sebesar 11,52 ml/day.
5. Jenis pelumasan yang seharusnya digunakan yaitu pelumasan otomatis dengan waktu pelumasan di bawah 3000 jam. Hal ini telah sesuai dengan kondisi aktual yaitu menggunakan pelumasan otomatis dengan waktu pelumasan setiap 37 menit.

5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan pada Tugas Akhir ini adalah:

1. Melakukan penggantian distributor pelumasan agar jumlah pelumasan mencukupi dari pelumasan yang seharusnya terlebih *bearing* berjenis *open bearing* dan bekerja di kondisi lingkungan yang kotor.
2. Komponen yang digunakan terus-menerus akan mengalami penurunan kekuatan material sehingga dilakukan pengecekan rutin.

DAFTAR PUSTAKA

1. Ahmed, R. 2002. *“Rolling Contact Fatigue”*. United Kingdom: Heriot – Watt University
2. Brooks, Charles R. dan Ashok Choudhury. 2002. *Failure Analysis of Engineering Materials*. New York: McGraw Hill
3. Glaeser, W.A dan S.J. Shaffer. 1996. *“Contact Fatigue”* dalam ASM Handbook Volume 19: *Fatigue and Fracture* (hlm. 331-336). Batelle Laboratories
4. Hamrock, J. Bernard dan William J. Anderson. 1983. *“Rolling – Element Bearings”* dalam NASA Reference Publication 1105
5. Juvinall, Robert C. dan Kurt M. Marshek. 1991. *Fundamentals of Machine Component Design*. Singapore: John Wiley & Son, Inc.
6. Sularso, dan Kiyokatsu Suga. 2004. *Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin*. Jakarta: Pradnya Paramita

Lampiran 1. Record Kerusakan Bogie Wheel Bearing Stacker/reclaimer 1

| Work Order | WO Description | Asset | Asset Description | Report Start | Sched Start | Target Start | Dept | Status | Type | Safety | Labor Grp | Notifications | Comments |
|----------------------------|--|---------|----------------------|--------------|-------------|--------------|------|--------|------|--------|-----------|--|--|
| Stacker Reclaimer 1 | | | | | | | | | | | | | |
| 2011/13501 | Replace gantry travelling wheel bearing no. S6 | 00EAD01 | STACKER RECLAIMER 01 | 21-Jan-11 | 27-Jan-11 | | EMH | CLOSE | CM | PFW | EMH_CP | Gantry wheel bearing land side [S.6] was damage /crack; | Replace bearing Ops :Ok, checked by Morning Shift 4 Feb 2011 |
| 2012/115456 | Replace the bogie wheel c/w bearing | 00EAD01 | STACKER RECLAIMER 01 | 21-May-12 | 30-May-12 | | EMH | CLOSE | CM | PFW | EMH_CP | Gantry whell south -east side and structure set noise during travelling; | Replace bogie whell and both side bearing and seal complete. item : 100850 and 112386, |
| 2012/123287 | Check ovality of wheel and the centerline between rail and bogie wheel | 00EAD01 | STACKER RECLAIMER 01 | 1-Jun-12 | 12-Jun-12 | | EMH | CLOSE | CM | PFW | EMH_CP | 2 pcs wheel gantry south - east side, visual not centre with rail;test at travell way 180-220 the visual wheel to south toward of rail , need to be investigated by EMH problem not centre on rail or bogie wheel? | action 1 :check ovality (dial gage) of wheel due to worn. Already repaired with reweld and grinding (deviation + 3 and -3, overall = 6 mm) action 2 :check the centerline rail and bogie will conducted with other WO |
| 2013/121238 | Install gantry wheel bearing U13 (c/w drive unit) | 00EAD01 | STACKER RECLAIMER 01 | 2-May-13 | 3-May-13 | | EMH | CLOSE | CI | PFW | EMH_CP | follow up WO :2013/100045-S | Replace gantry wheel bearing assy |
| 2014/176470 | replace gantry wheel bearing (drive) set for S6 | 00EAD01 | STACKER RECLAIMER 01 | 3-Jul-14 | 5-Jul-14 | | EMH | CLOSE | CM | PFW | EMH_CP | Gantry wheel no.S6 was noise and vibration, found bearing S6 north side temperature reach until 45 | replace gantry wheel (drive wheel) complete set with bearing cover housing. And esnuring all lubrication has normally inject |

| | | | | | | | | | | | | | |
|---------------|--|---------|----------------------|-----------|-----------|--|-----|-------|----|-----|--------|--|---|
| | | | | | | | | | | | | degree, other bearing gantry wheel only 29 degree; | |
| 2014/225433 | check and rectify grease distributor toward gantry wheel S6 and rectify the tubing grease leakage for drive pulley EAC23 | 00EAD01 | STACKER RECLAIMER 01 | 28-Aug-14 | 29-Aug-14 | | EMH | CLOSE | CI | PFW | EMH_CP | during walkdown inspection, found tubing grease for drive pulley bearing EAC23 has been leaks minor and need to verify the condition of grease distributor gantry S6 | replace broken tube for grease distributor toward EAC23 bearing. Check distributor grease S6 normal, could inject sufficient amount to bearing. |
| 2014/251518-1 | rectify the tubing leakage at gantry wheel | 00EAD01 | STACKER RECLAIMER 01 | 29-Sep-14 | 30-Sep-14 | | EMH | CLOSE | CI | LWC | EMH_CP | During PM found tube leakage at gantry wheel (follow up WO : 2014/2515 1B) | Replace leak tubing. |
| 2014/253340 | Replace gantry wheel bearing no. U11 driven | 00EAD01 | STACKER RECLAIMER 01 | 30-Sep-14 | 2-Oct-14 | | EMH | CLOSE | CM | PFW | EMH_CP | found gantry wheel NO. U-11 driven (north side) bearing broken; EMH assessment : No. U11 (near rail damp) | item :1149S2 Replace gantry wheel drive complete with bearing. |
| 2014/300262 | Replace gantry wheel bearing U7 | 00EAD01 | STACKER RECLAIMER 01 | 19-Nov-14 | 20-Nov-14 | | EMH | CLOSE | CI | PFW | EMH_CP | from history monitoring and PM, gantry wheel bearing U7 has been cracked and often loosen between shaft and shrinkdisc | Done replace with new wheel, replacement all bearing and seal complete set |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|--|---------|----------------------|-----------|-----------|--|-----|-------|----|-----|--------|---|---|
| 2015/324715 | Replace gantry wheel bearing S2 (no. 2 from east-nondrive) | 00EAD01 | STACKER RECLAIMER 01 | 23-Nov-15 | 24-Nov-15 | | EMH | CLOSE | CI | PFW | EMH_CP | Found gantry wheel bearing no 2 from east (S2) was crack on two position. | replace with refurbished wheel (non drive) 113700 refurbished non drive wheel Replace with refurbished wheel and relocation speed sensor to wheel S1 due not match with S2 shaft. |
| 2016/74 | Replace bogie wheel bearing no. U15 (at no equalizer bogie U8) | 00EAD01 | STACKER RECLAIMER 01 | 3-Jan-16 | 7-Jan-16 | | EMH | CLOSE | CM | PFW | EMH_CP | Boggie wheel bearing no equalizer U8-east side bearing is broken; EMH check equalizer U8 - > bogie wheel no U15 | Done replace boogie wheel bearing and restore gearbox & system |
| 2016/60437 | Replace gantry wheel bearing U13 | 00EAD01 | STACKER RECLAIMER 01 | 17-Mar-16 | 18-Mar-16 | | EMH | CLOSE | CI | PFW | EMH_CP | | gantry wheel bearing has been replaced with new one complete set. Gantry wheel motor Still simulated by EEC. raise WO 2016/SOS78 for adjust brake and normalze gantry wheel motor. DONE |
| 2016/67869 | replace bogie wheel bearing (boogie truck U4) | 00EAD01 | STACKER RECLAIMER 01 | 14-Jun-16 | 15-Jun-16 | | EMH | CLOSE | CM | PFW | EMH_CP | Bogie wheel no U4 bearing brocken.; | replace boogie wheel no U7 (drive),bogie truck U4.due to shaft broken (impacted to bearing broken also). replace with new wheel and shaft. DONE |

| | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---|---------|----------------------|-----------|-----------|--|-----|-------|----|------|--------|---|--|
| 2016/69743 | replace gantry wheel bearing no U9 | 00EAD01 | STACKER RECLAIMER 01 | 5-Jul-16 | 25-Jul-16 | | EMH | CLOSE | CI | PFW | EMH_CP | | replace bearing by P. Kandar) DONE |
| 2016/73512 | replace gantry wheel bearing U12 (wheel no 5 from west) | 00EAD01 | STACKER RECLAIMER 01 | 23-Aug-16 | 25-Aug-16 | | EMH | CLOSE | CI | PFW | EMH_CP | | DONE, replace gantry wheel U12 New wheel c/w bearing. |
| 2016/75009 | replace gantry wheel bearing U10 (no 7 from west) | 00EAD01 | STACKER RECLAIMER 01 | 11-Sep-16 | 13-Sep-16 | | EMH | CLOSE | CI | PFW | EMH_CP | | found bearing cage, and outerace has broken (north side). replace with refurbished old wheel replace new bearing both of found lip seal has been modified became 120x150x15 Done, replace gantry wheel no. 7 |
| 2017/12413 | rectify grease line (gantry wheel south-east side) | 00EAD01 | STACKER RECLAIMER 01 | 23-May-17 | 24-May-17 | | EMH | CLOSE | CM | ORAL | EMH_CP | Discharge pipe line of lubrication grease to gantry wheel south side - east end was leakaged; | Done, cut and conect with straigh coupling G6 |
| 2017/14211 | replace gantry wheel bearing S8 (drive wheel) | 00EAD01 | STACKER RECLAIMER 01 | 14-Jun-17 | 16-Jun-17 | | EMH | CLOSE | CI | PFW | EMH_CP | found gantry wheel S8 has bearing failure , indicate is wheeltrim to north side. | Done, replace gantry wheel and bearing S8 |
| 2017/26479 | replace gantry wheel bearing U2 (non drive) | 00EAD01 | STACKER RECLAIMER 01 | 31-Oct-17 | 1-Nov-17 | | EMH | CLOSE | CI | PFW | EMH_CP | Found crack at wheel U2 | Done replace whell and bearing and seal. |

Lampiran 2. Record Kerusakan Bogie Wheel Bearing Stacker/reclaimer 2

| Work Order | WO Description | Asset | Asset Description | Report Start | Sched Start | Target Start | Dept | Status | Type | Safety | Labor Grp | Notifications | Comments |
|----------------------------|---|---------|----------------------|--------------|-------------|--------------|------|--------|------|--------|-----------|--|---|
| Stacker Reclaimer 2 | | | | | | | | | | | | | |
| 2010/3366 | Realignment gantry wheel No S3 and cut scrapper plate that touch the rail | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 07-Jan-10 | 4-Apr-10 | | EMH | CLOSE | CM | LWC | EMH_CP | Gantry wheel S3 and S4 (South -midle pin bogie no. S2) not center during travelling EAD01 at bellow;travell 150 meter to east, and make noise. | Bogie S2 alignment done, S1 And N1 will be assessed and executed by another WO Ops :Ok |
| 2013/8581 | Insitu repair : rewelding gantry wheel no S2 (non-drive) and check the roundness (dialgage measurement) | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 10-Jan-13 | 14-Jan-13 | | EMH | CLOSE | CI | PFW | EMH_CP | Reported by P. Sukiman : gantry wheel no. S2 east side was cracked and decide to repair insitu | repair the cracked wheel with welding insitu, process preheating 250 C and grinding flush with tolerance around 0.05 mm (dial gage measurement) |
| 2013/8581 | Replacement gantry wheel bearing S3 (modified drive wheel) with the refurbished one | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 10-Jan-13 | 17-Jan-13 | | EMH | CLOSE | CI | PFW | EMH_CP | Replace gantry bearing S3 (modified) with non drive wheel already refurbished at workshop UYA3 | Preparing wheel and it's parts completed. Install assy wheel short shaft (non-drive wheel) |
| 2013/74489 | Replacement gantry wheel bearing no. S8 | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 15-Mar-13 | 25-Mar-13 | | EMH | CLOSE | CI | PFW | EMH_CP | During walkdown inspection gantry wheel bearing S8 found cracked. Decide to replace with spare | Collect and assembly all parts. replacement with spare wheel was completed |

| | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|--|---------|----------------------------|-----------|-----------|--|-----|-------|----|-----|--------|---|---|
| 2013/1093 76 | Replace bearing for gantry wheel drive U11 | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 17-Apr-13 | 17-Apr-13 | | EMH | CLOSE | CM | PFW | EMH_CP | Wheelgantry north side no, 6 from west noise; | Replace bearing gantry wheel both side. |
| 2013/1585 72 | Check and replace bearing for gantry wheel U16 | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 10-Jun-13 | 11-Jun-13 | | EMH | CLOSE | CM | PFW | EMH_CP | Gantry whell set no. U15 and U16 noise; Check result : noise at U16 | item :112386 Replace bearing both side and re install back |
| 2013/2330 00 | Replace gantry wheel bearing S2 | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 5-Sep-13 | 6-Sep-13 | | EMH | CLOSE | CI | PFW | EMH_CP | gantry wheel bearing S2 after last defect was replace with unsuitable wheel (used drive type), should be use un-drive. So decide to return to original design | Replace wheel gantry bearing done |
| 2013/2332 40 | replace gantry wheel bearing with refurbished one | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 5-Sep-13 | 17-Sep-13 | | EMH | CLOSE | CM | PFW | EMH_CP | Gantry whell no.S2 south noise during forward and backward;EMH : not S2 and the wheel should be S3 mounted at bogie truck no.2 (no 3 from, the east near ladder).and this position already known by EMH | noise due to ovality so replace with refurbished wheel bearing (welding c/w PWHT and machining at workshop) |
| 2013/2685 10 | Re-install gantry wheel bearing non drive no. U14 | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 1-Oct-13 | 2-Oct-13 | | EMH | CLOSE | CI | PFW | EMH_CP | preparation has completed and already to installed. follow up WO : 2013/252576 | done re-install gantry wheel U14, remove temporary support. install new bearing insitu welding |
| 2014/7167 6-1 | Rewelding gantry wheel insitu | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 3-Apr-14 | 4-Apr-14 | | EMH | CLOSE | CI | PFW | EMH_CP | Follow up WO : 2014/71676, found wheel | |

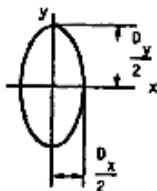
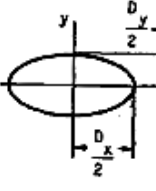
| | | | | | | | | | | | | | |
|-------------|---|---------|----------------------|-----------|-----------|--|-----|-------|----|------|--------|--|---|
| | | | | | | | | | | | | no. U8 has cracked | |
| 2014/309609 | replace gantry wheel bearing no.U8 | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 27-Nov-14 | 28-Nov-14 | | EMH | CLOSE | CI | PFW | EMH_CP | last monitoring this wheel bearing U8 has been cracked and already repair insit u. better for replace | Replace gantry wheel and bearing. |
| 2014/337009 | Replace gantry wheel bearing U7 (driven) | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 24-Dec-14 | 5-Jan-15 | | EMH | CAN | CI | PFW | EMH_CP | last check and several reporting during PM, has been cracked | pending to next outage, need 2 days window unavailable |
| 2015/29052 | Replace gantry wheel bearing S6 | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 28-Jan-15 | 30-Jan-15 | | EMH | CLOSE | CM | PFW | EMH_CP | Bogie wheel bearing S6, U6 and U9 cracked, as at drawing attached.; EMH :Will be replace S6, U9 and US will executed with other WO for rewelding | Replace gantry wheel.shaft and bearing |
| 2015/76255 | Replace gantry wheel bearing U2 | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 10-Mar-15 | 11-Mar-15 | | EMH | CLOSE | CI | PFW | EMH_CP | Found crack on gantry wheel bearing north side, no 2 from east. (U2) Non drive wheel | SI gantry wheel :114651 SI bearing 22222:112386 Replace wheel and bearing . |
| 2015/89215 | Replace gantry wheel bearing U9 (drive) | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 25-Mar-15 | 30-Mar-15 | | EMH | CLOSE | CI | PFW | EMH_CP | | Replace with refurbish wheel and new bearing. |
| 2015/212752 | cleaning distributor to gantry wheel no 1 (east side) | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 4-Aug-15 | 4-Aug-15 | | EMH | CLOSE | CI | ORAL | EMH_CP | follow up wo 2015/203820 Found distributor for gantry wheel south-north east side were not working. pm.by Kimansu.. | has been unblocked and runtest.working property.Done |

| | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------|--|---------|----------------------------|-----------|-----------|--|-----|-------|----|-----|--------|--|---|
| 2015/3576 06 | Replace gantry wheel bearing S10 (drive) | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 29-Dec-15 | 30-Dec-15 | | EMH | CLOSE | CI | PFW | EMH_CP | found gantry wheel bearing (S10) surface got worn out and initial surface crack | replace S10 due to already cracked (more worse condition) also replace geabox shaft seal (output cover) leakage done replace drive wheel ,also replace seal gearbox output (leaks) |
| 2016/6115 7 | replace gantry wheel bearing U6 | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 28-Mar-16 | 29-Mar-16 | | EMH | CLOSE | CI | PFW | EMH_CP | crack on back - 2 position (monitoring) planing for replacement with refurbished on outage. | 11238S ; 11S180 Done, new wheel c/w shaft and both side bearing |
| 2016/6560 8 | replace gantry wheel bearing S5 (non drive) | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 23-May-16 | 1-Jun-16 | | EMH | CLOSE | CI | PFW | EMH_CP | found crack on gantry wheel bearing (back- surface) | si116180; 112386 (2 ea) ; 100850 (2 ea) Replace gantry wheel bearing S5 (non drive) |
| 2016/7386 5 | replace gantry wheel bearing U15 (no 2 from west) | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 26-Aug-16 | 31-Aug-16 | | EMH | CLOSE | CI | PFW | EMH_CP | found wheel bearing U15 back crack to surface | both of wheel and bearing are original. back crack to wheel surface. day 1 :disconnect cable motor, brake and simulate by eec, wheel replacement by EMH. Document suspend. day 2 :eec connect motor and brake cable (normalize systm). 11238S ; Done, replace with new wheel, |

| | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|--|---------|----------------------|-----------|-----------|--|-----|-------|----|------|--------|---|---|
| | | | | | | | | | | | | | both bearing and seal 2 pcs. |
| 2016/7713 1 | replace gantry wheel bearing U1 | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 7-Oct-16 | 26-Oct-16 | | EMH | CLOSE | CM | PFW | EMH_CP | Gantry wheel bearing no. U1 crack; | 112386 100850 ,si: 11S180 wheel replace with new wheel. DONE |
| 2016/7948 7 | rectify grease line above gantry wheel S3 | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 7-Nov-16 | 7-Nov-16 | | EMH | CLOSE | CM | ORAL | EMH_CP | Discharge pipe line of lubrication grease was leaked due to joint connection loose,position | Cut and conect by installing straigh coupling |
| 2016/8136 4 | Replace gantry wheel bearing no.U10 | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 29-Nov-16 | 29-Nov-16 | | EMH | CLOSE | CM | PFW | EMH_CP | Gantry wheel north side n0.7 from west the bearing is noise; | Done only replace the bearing. Shaft and existing wheel still in good condit on (Wheel U10) |
| 2017/1420 | welding insitu gantry wheel S7 | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 16-Jan-17 | 18-Jan-17 | | EMH | CLOSE | CI | PFW | EMH_CP | Found boobie wheel crack no. S7 need to inspect pm.by Kimansu. | Weld cracked wheel insitu then flatenning. |
| 2017/1407 3 | manual inject with grease gun gantry wheel distributor no S2 | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 12-Jun-17 | 13-Jun-17 | | EMH | CLOSE | CI | ORAL | EMH_CP | Found gantry wheel distributor no.S2 stuck need to clean l inject pm by Kimansu | Done, clean and inject with new grease |
| 2017/2846 5 | replace gantry wheel bearing non drive (south side) (S7) | 00EAD02 | STACKER RECLAIMER 02 | 24-Nov-17 | 5-Dec-17 | | EMH | CLOSE | CM | PFW | EMH_CP | Gantry wheel bearing no S7 crack. | Done replace new wheel and bearing both side |

Lampiran 3. Persamaan *contact fatigue*

TABLE 12. - SIMPLIFIED EQUATIONS

| | |
|--|---|
|  |  |
| $\alpha \geq 1$ | $\alpha < 1$ |
| $\bar{k} = \frac{2}{\alpha}$ | $\bar{k} = \frac{2}{\alpha}$ |
| $\bar{\nu} = \frac{\pi}{2} + q \ln \alpha$ | $\bar{\nu} = \frac{\pi}{2} + q \ln \alpha$ |
| <p>where $q = \frac{\pi}{2} - 1$</p> | <p>where $q = \frac{\pi}{2} - 1$</p> |
| $\bar{\sigma} = 1 + \frac{q}{\alpha}$ | $\bar{\sigma} = 1 + qa$ |
| $D_y = 2 \left(\frac{6k^2 \sigma FR}{\pi E'} \right)^{1/3}$ | $D_y = 2 \left(\frac{6k \sigma FR}{\pi E'} \right)^{1/3}$ |
| <p>where $R^{-1} = R_x^{-1} + R_y^{-1}$</p> | <p>where $R^{-1} = R_x^{-1} + R_y^{-1}$</p> |
| $D_x = 2 \left(\frac{5 \sigma FR}{\pi k E'} \right)^{1/3}$ | $D_x = 2 \left(\frac{6 \sigma FR}{\pi E' k^2} \right)^{1/3}$ |
| $\delta = \bar{\sigma} \left[\left(\frac{4.5}{\sigma R} \right) \left(\frac{F}{\pi k E'} \right)^2 \right]^{1/3}$ | $\delta = \bar{\sigma} \left[\left(\frac{4.5}{\sigma R} \right) \left(\frac{Fk}{\pi E'} \right)^2 \right]^{1/3}$ |

Lampiran 4. Tabel nilai variabel pada *contact fatigue*

TABLE 11. - COMPARISON OF NUMERICALLY DETERMINED VALUES WITH CURVE-FIT VALUES FOR GEOMETRICALLY DEPENDENT VARIABLES

[$R_x = 1.0 \text{ cm.}$]

| Radius-of-curvature ratio, α | Ellipticity parameter, k | Ellipticity | | Complete elliptic integral of first kind | | | Complete elliptic integral of second kind | | |
|-------------------------------------|----------------------------|-------------|--------------------|--|---------------|--------------------|---|---------------|--------------------|
| | | \bar{k} | Percent error, e | \mathcal{E} | \mathcal{E} | Percent error, e | \mathcal{E} | \mathcal{E} | Percent error, e |
| 1.00 | 1.0000 | 1.0000 | 0 | 1.5708 | 1.5708 | 0 | 1.5708 | 1.5708 | 0 |
| 1.25 | 1.1604 | 1.1526 | .66 | 1.6897 | 1.6892 | -.50 | 1.4643 | 1.4566 | .52 |
| 1.50 | 1.3101 | 1.2945 | 1.19 | 1.7898 | 1.8022 | -.70 | 1.3911 | 1.3805 | .76 |
| 1.75 | 1.4514 | 1.4280 | 1.61 | 1.8761 | 1.8902 | -.75 | 1.3378 | 1.3262 | .87 |
| 2.00 | 1.5858 | 1.5547 | 1.96 | 1.9521 | 1.9664 | -.73 | 1.2972 | 1.2854 | .91 |
| 3.00 | 2.0720 | 2.0125 | 2.87 | 2.1883 | 2.1979 | -.44 | 1.2002 | 1.1903 | .83 |
| 4.00 | 2.5007 | 2.4170 | 3.35 | 2.3595 | 2.3621 | -.11 | 1.1506 | 1.1427 | .69 |
| 5.00 | 2.8902 | 2.7860 | 3.61 | 2.4937 | 2.4895 | .17 | 1.1205 | 1.1142 | .57 |
| 6.00 | 3.2505 | 3.1289 | 3.74 | 2.6040 | 2.5935 | .40 | 1.1004 | 1.0951 | .48 |
| 7.00 | 3.5878 | 3.4515 | 3.80 | 2.6975 | 2.6815 | .59 | 1.0859 | 1.0815 | .40 |
| 8.00 | 3.9065 | 3.7577 | 3.81 | 2.7786 | 2.7577 | .75 | 1.0751 | 1.0713 | .35 |
| 9.00 | 4.2096 | 4.0503 | 3.78 | 2.8502 | 2.8250 | .88 | 1.0666 | 1.0634 | .30 |
| 10.00 | 4.4994 | 4.3313 | 3.74 | 2.9142 | 2.8851 | 1.00 | 1.0599 | 1.0571 | .26 |
| 15.00 | 5.7996 | 5.6069 | 3.32 | 3.1603 | 3.1165 | 1.38 | 1.0397 | 1.0381 | .15 |
| 20.00 | 6.9287 | 6.7338 | 2.81 | 3.3342 | 3.2807 | 1.60 | 1.0296 | 1.0285 | .10 |
| 25.00 | 7.9440 | 7.7617 | 2.29 | 3.4685 | 3.4081 | 1.74 | 1.0236 | 1.0228 | .07 |
| 30.00 | 8.8762 | 8.7170 | 1.79 | 3.5779 | 3.5122 | 1.84 | 1.0196 | 1.0190 | .05 |
| 35.00 | 9.7442 | 9.6158 | 1.32 | 3.6700 | 3.6002 | 1.90 | 1.0167 | 1.0163 | .04 |
| 40.00 | 10.5605 | 10.4689 | .87 | 3.7496 | 3.6764 | 1.95 | 1.0146 | 1.0143 | .03 |
| 45.00 | 11.3340 | 11.2841 | .44 | 3.8196 | 3.7436 | 1.99 | 1.0129 | 1.0127 | .02 |
| 50.00 | 12.0711 | 12.0670 | .03 | 3.8821 | 3.8038 | 2.02 | 1.0116 | 1.0114 | .02 |
| 60.00 | 13.4557 | 13.5521 | -.72 | 3.9898 | 3.9078 | 2.06 | 1.0096 | 1.0095 | .01 |
| 70.00 | 14.7430 | 14.9495 | -1.40 | 4.0806 | 3.9958 | 2.08 | 1.0082 | 1.0082 | .01 |
| 80.00 | 15.9522 | 16.2759 | -2.03 | 4.1590 | 4.0720 | 2.09 | 1.0072 | 1.0071 | .01 |
| 90.00 | 17.0969 | 17.5432 | -2.61 | 4.2280 | 4.1393 | 2.10 | 1.0064 | 1.0063 | 0 |
| 100.00 | 18.1871 | 18.7603 | -3.15 | 4.2895 | 4.1994 | 2.10 | 1.0057 | 1.0057 | 0 |

Lampiran 5. Spesifikasi material 100Cr6

| | | | | | | | | | |
|---|---|--|--------------------------------------|------------------------|--|--------------------------------|--|----------------|----------|
| Quality | | 100Cr6 | | | | | | Technical card | |
| According to standards | | EN ISO 683-17: 1999 | | | | | | Lucifin Group | |
| Number | | 1.3505 | | | | | | | |
| Chemical composition | | | | | | | | | |
| C% | Si% | Mn% | P% max | S% max | Cr% | Mo% max | Al% max | Cu% max | |
| 0,93-1,05 ± 0,03 | 0,15-0,35 ± 0,03 | 0,25-0,45 ± 0,04 | 0,025 + 0,005 | 0,015 + 0,005 | 1,35-1,60 ± 0,05 | 0,10 ± 0,03 | 0,050 + 0,010 | 0,30 + 0,03 | |
| Product deviations are allowed | | | | | | | | | |
| Temperature °C | | | | | | | | | |
| Hot-forming | Quenching ¹⁾ | Quenching ²⁾ | Tempering ¹⁾²⁾ | | Stress relief annealing ³⁾ | | ³⁾ stress relief annealing is suggested to be carried out after machining and before final heat treatment | | |
| 1050-900 | heating up to 650, pause, then 800-830 water | 830-870 oil/ polymer salt bath 500-550 salt bath 180-200 | 150-300 air | | 600-650 furnace cooling | | | | |
| Isothermal annealing ⁴⁾ | Spheroidized annealing ⁵⁾ AC | Recrystallization annealing | | Pre-heating welding | | Stress-relieving after welding | | | |
| 800 rapid cooling to 720, pause, then air (HB max 210) | 720-750 cooling 10 °C/h to 650, pause, then 40 °C/h to 300, then air (HB max 220) | 750-750 furnace cooling to 300, then air | | not recommended | | | | | |
| | | | | | | Ac1 755 | Ac3 850 | Ms 300 | Mf 85 |
| Hardness in the globular annealed and cold-worked state (hot rolled ⁶⁾ AC+AC) can be HB 240 | | | | | | | | | |
| Mechanical and physical properties | | | | | | | | | |
| Table of tempering values obtained at room temperature on round of Ø 10 mm after quenching at 840 °C in oil | | | | | | | | | |
| HV 30 | 832 | 800 | 772 | 746 | 674 | 633 | 577 | 528 | 471 |
| HRC | 65 | 64 | 63 | 62 | 59 | 57 | 54 | 51 | 47 |
| R | N/mm ² | | 2400 | 2500 | 2420 | 2300 | 2100 | 1900 | 1650 |
| Tempering °C | 100 | 150 | 200 | 250 | 300 | 350 | 400 | 450 | 500 |
| Hardening depth from surface to core (Ø) on round tempered at 850 °C in oil. Hardness values expressed in HRC | | | | | | | | | |
| mm | 20 | 15 | 10 | 5 | 0 | 5 | 10 | 15 | 20 |
| Ø 20 | | | 65 | 64 | 64 | 64 | 65 | | |
| Ø 30 | | 64 | 62 | 59 | 58 | 59 | 62 | 64 | |
| Ø 40 | 62 | 57 | 52 | 50,5 | 50 | 50,5 | 52 | 57 | 62 |
| Evolution of the austenitic grain size as a function of the material heating temperature | | | | | | | | | |
| Grain size | 8 - 9 | 7 - 8 | 7 | 6 | 5 | 4 - 5 | 4 | | |
| Temperature °C | 830 | 850 | 900 | 950 | 1000 | 1050 | | | |
| Thermal expansion | 10 ⁻⁶ . K ⁻¹ | 11,4 | | | | | | 14,7 | |
| Modulus of elasticity | longitudinal | 210 | | | | | | | |
| Modulus of elasticity | transversal | 80 | | | | | | | |
| Bulk Modulus | 140 | | | | | | | | |
| Poisson number | 0,30 | | | | | | | | |
| Test at °C | 20 | 100 | 200 | 300 | 400 | 500 | 700 | | |
| The symbol ► indicates temperature between 20 °C and 100 °C, 20 °C and 700 °C | | | | | | | | | |
| Data under fatigue with low cycle number. Values for quenched and tempered material | | | | | | | | | |
| Cyclic yield strength, σ _y ' | Cyclic strength exponent, n' | | Cyclic strength coefficient, K', MPa | | Fatigue strength coefficient, σ _r ' , MPa | | Fatigue strength exponent, b | | |
| 1324 | 0,15 | | 3403 | | 2642 | | -0,09 | | |
| Specific heat | Density | Thermal conductivity | | Electrical resistivity | | Electrical conductivity | | | |
| J/(Kg.K) | Kg/dm ³ | W/(m.K) | | Ohm.mm/m | | Siemens.m/mm ² | | | |
| 475 | 7,81 | 46,5 | | 0,22 | | 4,55 | | | |
| EUROPE EN | ITALY UNI | CHINA GB | GERMANY DIN | FRANCE AFNOR | U.K. BS | RUSSIA GOST | USA AISI/SAE | | |
| 100Cr6 | 100Cr6 | GCr15 | 1.3505 | 100Cr6 | | 9Ch1 | 52100 | | |

Lampiran 6. Tabel Excel Perhitungan Fluktuasi dan Distribusi Normal antara Beban Kerja dengan Kekuatan Material (SF: 1,5 – 2)

| Beban Kerja | | | | | | |
|-------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|-------------|
| Siklus | SF Random | Load (kN) | Load * SF | Avg | Std Dev | Dist |
| 1 | 1.776 | 293.96 | 522.07296 | 515.2554 | 41.11671 | 0.009570214 |
| 2 | 1.641 | 293.96 | 482.38836 | | | 0.007049202 |
| 3 | 1.823 | 293.96 | 535.88908 | | | 0.008554729 |
| 4 | 1.715 | 293.96 | 504.1414 | | | 0.009354618 |
| 5 | 1.731 | 293.96 | 508.84476 | | | 0.009585463 |
| 6 | 1.547 | 293.96 | 454.75612 | | | 0.003286714 |
| 7 | 1.714 | 293.96 | 503.84744 | | | 0.009336319 |
| 8 | 1.634 | 293.96 | 480.33064 | | | 0.006764292 |
| 9 | 1.507 | 293.96 | 442.99772 | | | 0.002071371 |
| 10 | 1.875 | 293.96 | 551.175 | | | 0.006624749 |
| 11 | 1.653 | 293.96 | 485.91588 | | | 0.007521861 |
| 12 | 1.698 | 293.96 | 499.14408 | | | 0.008985674 |
| 13 | 1.782 | 293.96 | 523.83672 | | | 0.009493647 |
| 14 | 1.682 | 293.96 | 494.44072 | | | 0.008535772 |
| 15 | 1.641 | 293.96 | 482.38836 | | | 0.007049202 |
| 16 | 1.65 | 293.96 | 485.034 | | | 0.007405914 |
| 17 | 1.802 | 293.96 | 529.71592 | | | 0.0091208 |
| 18 | 1.52 | 293.96 | 446.8192 | | | 0.002428385 |
| 19 | 1.702 | 293.96 | 500.31992 | | | 0.009083217 |
| 20 | 1.75 | 293.96 | 514.43 | | | 0.009700725 |
| 21 | 1.849 | 293.96 | 543.53204 | | | 0.007659333 |
| 22 | 1.711 | 293.96 | 502.96556 | | | 0.009278791 |
| 23 | 1.603 | 293.96 | 471.21788 | | | 0.005467614 |
| 24 | 1.972 | 293.96 | 579.68912 | | | 0.002842008 |
| 25 | 1.894 | 293.96 | 556.76024 | | | 0.00582942 |
| 26 | 1.726 | 293.96 | 507.37496 | | | 0.009526099 |
| 27 | 1.87 | 293.96 | 549.7052 | | | 0.006830529 |
| 28 | 1.778 | 293.96 | 522.66088 | | | 0.009546575 |
| 29 | 1.623 | 293.96 | 477.09708 | | | 0.006307662 |
| 30 | 1.618 | 293.96 | 475.62728 | | | 0.006097941 |
| 31 | 1.916 | 293.96 | 563.22736 | | | 0.004912467 |
| 32 | 1.699 | 293.96 | 499.43804 | | | 0.009010652 |
| 33 | 1.875 | 293.96 | 551.175 | | | 0.006624749 |
| 34 | 1.733 | 293.96 | 509.43268 | | | 0.009605874 |
| 35 | 1.512 | 293.96 | 444.46752 | | | 0.002204262 |
| 36 | 1.857 | 293.96 | 545.88372 | | | 0.007351873 |
| 37 | 1.881 | 293.96 | 552.93876 | | | 0.006375216 |
| 38 | 1.75 | 293.96 | 514.43 | | | 0.009700725 |
| 39 | 1.701 | 293.96 | 500.02596 | | | 0.009059427 |
| 40 | 2 | 293.96 | 587.92 | | | 0.002035554 |

| | | | | | | |
|----|-------|--------|-----------|--|--|-------------|
| 41 | 1.864 | 293.96 | 547.94144 | | | 0.007073979 |
| 42 | 1.625 | 293.96 | 477.685 | | | 0.006391269 |
| 43 | 1.784 | 293.96 | 524.42464 | | | 0.00946439 |
| 44 | 1.527 | 293.96 | 448.87692 | | | 0.002636026 |
| 45 | 1.843 | 293.96 | 541.76828 | | | 0.007881399 |
| 46 | 1.602 | 293.96 | 470.92392 | | | 0.005425768 |
| 47 | 1.676 | 293.96 | 492.67696 | | | 0.00834473 |
| 48 | 1.669 | 293.96 | 490.61924 | | | 0.008108365 |
| 49 | 1.585 | 293.96 | 465.9266 | | | 0.004724355 |
| 50 | 1.61 | 293.96 | 473.2756 | | | 0.00576146 |
| 51 | 1.688 | 293.96 | 496.20448 | | | 0.008715137 |
| 52 | 1.972 | 293.96 | 579.68912 | | | 0.002842008 |
| 53 | 1.512 | 293.96 | 444.46752 | | | 0.002204262 |
| 54 | 1.928 | 293.96 | 566.75488 | | | 0.004428227 |
| 55 | 1.681 | 293.96 | 494.14676 | | | 0.008504717 |
| 56 | 1.813 | 293.96 | 532.94948 | | | 0.008844595 |
| 57 | 1.564 | 293.96 | 459.75344 | | | 0.003901404 |
| 58 | 1.66 | 293.96 | 487.9736 | | | 0.007785572 |
| 59 | 1.716 | 293.96 | 504.43536 | | | 0.009372474 |
| 60 | 1.621 | 293.96 | 476.50916 | | | 0.006223876 |
| 61 | 1.964 | 293.96 | 577.33744 | | | 0.003103423 |
| 62 | 1.642 | 293.96 | 482.68232 | | | 0.007089422 |
| 63 | 1.853 | 293.96 | 544.70788 | | | 0.007507097 |
| 64 | 1.83 | 293.96 | 537.9468 | | | 0.008332115 |
| 65 | 1.61 | 293.96 | 473.2756 | | | 0.00576146 |
| 66 | 1.552 | 293.96 | 456.22592 | | | 0.003462004 |
| 67 | 1.554 | 293.96 | 456.81384 | | | 0.003533446 |
| 68 | 1.829 | 293.96 | 537.65284 | | | 0.008364841 |
| 69 | 1.902 | 293.96 | 559.11192 | | | 0.005493396 |
| 70 | 1.7 | 293.96 | 499.732 | | | 0.009035237 |
| 71 | 1.608 | 293.96 | 472.68768 | | | 0.00567738 |
| 72 | 1.591 | 293.96 | 467.69036 | | | 0.00496928 |
| 73 | 1.878 | 293.96 | 552.05688 | | | 0.00650028 |
| 74 | 1.595 | 293.96 | 468.8662 | | | 0.005134326 |
| 75 | 1.949 | 293.96 | 572.92804 | | | 0.003627988 |
| 76 | 1.75 | 293.96 | 514.43 | | | 0.009700725 |
| 77 | 1.595 | 293.96 | 468.8662 | | | 0.005134326 |
| 78 | 1.796 | 293.96 | 527.95216 | | | 0.009250928 |
| 79 | 1.516 | 293.96 | 445.64336 | | | 0.002314558 |
| 80 | 1.918 | 293.96 | 563.81528 | | | 0.004830699 |

Kekuatan Material

| Siklus | SF Random | Kekuatan Material (kN) | Load * SF | Avg | Std Dev | Dist |
|--------|-----------|------------------------|-----------|----------|----------|-------------|
| 1 | 1.703 | 572 | 974.116 | 998.6137 | 85.11508 | 4.49692E-03 |
| 2 | 1.887 | 572 | 1079.364 | | | 0.00298852 |
| 3 | 1.754 | 572 | 1003.288 | | | 0.00468003 |
| 4 | 1.96 | 572 | 1121.12 | | | 0.001663656 |
| 5 | 1.575 | 572 | 900.9 | | | 0.002425019 |
| 6 | 1.559 | 572 | 891.748 | | | 0.002131056 |
| 7 | 1.946 | 572 | 1113.112 | | | 0.001896495 |
| 8 | 1.878 | 572 | 1074.216 | | | 0.003159237 |
| 9 | 1.525 | 572 | 872.3 | | | 0.00155836 |
| 10 | 1.634 | 572 | 934.648 | | | 0.003533968 |
| 11 | 1.963 | 572 | 1122.836 | | | 0.001615745 |
| 12 | 1.933 | 572 | 1105.676 | | | 0.002124879 |
| 13 | 1.959 | 572 | 1120.548 | | | 0.001679787 |
| 14 | 1.857 | 572 | 1062.204 | | | 0.003545666 |
| 15 | 1.784 | 572 | 1020.448 | | | 0.004535383 |
| 16 | 1.656 | 572 | 947.232 | | | 0.003906344 |
| 17 | 1.548 | 572 | 885.456 | | | 0.001936866 |
| 18 | 1.963 | 572 | 1122.836 | | | 0.001615745 |
| 19 | 1.703 | 572 | 974.116 | | | 0.00449692 |
| 20 | 1.609 | 572 | 920.348 | | | 0.003071134 |
| 21 | 1.975 | 572 | 1129.7 | | | 0.001431679 |
| 22 | 1.519 | 572 | 868.868 | | | 0.001466651 |
| 23 | 1.968 | 572 | 1125.696 | | | 0.001537552 |
| 24 | 1.658 | 572 | 948.376 | | | 0.003937812 |
| 25 | 1.695 | 572 | 969.54 | | | 0.004421477 |
| 26 | 1.98 | 572 | 1132.56 | | | 0.001358707 |
| 27 | 1.968 | 572 | 1125.696 | | | 0.001537552 |
| 28 | 1.698 | 572 | 971.256 | | | 0.004451126 |
| 29 | 1.982 | 572 | 1133.704 | | | 0.00133015 |
| 30 | 1.986 | 572 | 1135.992 | | | 0.001274133 |
| 31 | 1.782 | 572 | 1019.304 | | | 0.004550636 |
| 32 | 1.949 | 572 | 1114.828 | | | 0.001845376 |
| 33 | 1.904 | 572 | 1089.088 | | | 0.002664098 |
| 34 | 1.794 | 572 | 1026.168 | | | 0.00444781 |
| 35 | 1.663 | 572 | 951.236 | | | 0.004014422 |
| 36 | 1.539 | 572 | 880.308 | | | 0.001783954 |
| 37 | 1.848 | 572 | 1057.056 | | | 0.003702781 |
| 38 | 1.616 | 572 | 924.352 | | | 0.003203349 |
| 39 | 1.873 | 572 | 1071.356 | | | 0.003253112 |
| 40 | 1.518 | 572 | 868.296 | | | 0.001451671 |

| | | | | | |
|----|-------|-----|----------|--|-------------|
| 41 | 1.989 | 572 | 1137.708 | | 0.001233089 |
| 42 | 1.804 | 572 | 1031.888 | | 0.004342274 |
| 43 | 1.783 | 572 | 1019.876 | | 0.004543106 |
| 44 | 1.702 | 572 | 973.544 | | 0.004488129 |
| 45 | 1.871 | 572 | 1070.212 | | 0.003290398 |
| 46 | 1.942 | 572 | 1110.824 | | 0.001965619 |
| 47 | 1.95 | 572 | 1115.4 | | 0.00182848 |
| 48 | 1.613 | 572 | 922.636 | | 0.003146855 |
| 49 | 1.815 | 572 | 1038.18 | | 0.004207071 |
| 50 | 1.913 | 572 | 1094.236 | | 0.002493645 |
| 51 | 1.647 | 572 | 942.084 | | 0.003759406 |
| 52 | 1.631 | 572 | 932.932 | | 0.00348012 |
| 53 | 1.822 | 572 | 1042.184 | | 0.004111518 |
| 54 | 1.536 | 572 | 878.592 | | 0.001734304 |
| 55 | 1.84 | 572 | 1052.48 | | 0.003836474 |
| 56 | 1.92 | 572 | 1098.24 | | 0.002362664 |
| 57 | 1.894 | 572 | 1083.368 | | 0.002854915 |
| 58 | 1.812 | 572 | 1036.464 | | 0.004245822 |
| 59 | 1.865 | 572 | 1066.78 | | 0.003401152 |
| 60 | 1.838 | 572 | 1051.336 | | 0.003868897 |
| 61 | 1.986 | 572 | 1135.992 | | 0.001274133 |
| 62 | 1.579 | 572 | 903.188 | | 0.002500119 |
| 63 | 1.987 | 572 | 1136.564 | | 0.001260359 |
| 64 | 1.968 | 572 | 1125.696 | | 0.001537552 |
| 65 | 1.613 | 572 | 922.636 | | 0.003146855 |
| 66 | 1.944 | 572 | 1111.968 | | 0.001930922 |
| 67 | 1.776 | 572 | 1015.872 | | 0.004591725 |
| 68 | 1.685 | 572 | 963.82 | | 0.00431139 |
| 69 | 1.979 | 572 | 1131.988 | | 0.001373122 |
| 70 | 1.722 | 572 | 984.984 | | 0.004627382 |
| 71 | 1.577 | 572 | 902.044 | | 0.002462505 |
| 72 | 1.936 | 572 | 1107.392 | | 0.002071249 |
| 73 | 1.597 | 572 | 913.484 | | 0.002842378 |
| 74 | 1.819 | 572 | 1040.468 | | 0.004153326 |
| 75 | 1.602 | 572 | 916.344 | | 0.002937867 |
| 76 | 1.783 | 572 | 1019.876 | | 0.004543106 |
| 77 | 1.879 | 572 | 1074.788 | | 0.003140364 |
| 78 | 1.853 | 572 | 1059.916 | | 0.003616287 |
| 79 | 1.742 | 572 | 996.424 | | 0.004685542 |
| 80 | 1.677 | 572 | 959.244 | | 0.00421158 |

Lampiran 7. Tabel Excel Perhitungan Fluktuasi dan Distribusi Normal antara *Contact Fatigue* (SF: 1,5 – 2) dengan Kekuatan Material (SF: 2 – 2,5)

| Contact Fatigue | | | | | | |
|-----------------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|-------------|
| Siklus | SF Random | Load (kN) | Load * SF | Avg | Std Dev | Dist |
| 1 | 1.824 | 440.94 | 804.27456 | 767.1226 | 62.29903 | 0.005360488 |
| 2 | 1.813 | 440.94 | 799.42422 | | | 0.005598247 |
| 3 | 1.908 | 440.94 | 841.31352 | | | 0.003151154 |
| 4 | 1.786 | 440.94 | 787.51884 | | | 0.006069511 |
| 5 | 1.894 | 440.94 | 835.14036 | | | 0.003528465 |
| 6 | 1.551 | 440.94 | 683.89794 | | | 0.002623658 |
| 7 | 1.55 | 440.94 | 683.457 | | | 0.002598902 |
| 8 | 1.991 | 440.94 | 877.91154 | | | 0.00131735 |
| 9 | 1.678 | 440.94 | 739.89732 | | | 0.005820477 |
| 10 | 1.688 | 440.94 | 744.30672 | | | 0.005988303 |
| 11 | 1.508 | 440.94 | 664.93752 | | | 0.001668098 |
| 12 | 1.805 | 440.94 | 795.8967 | | | 0.005755804 |
| 13 | 1.957 | 440.94 | 862.91958 | | | 0.001963279 |
| 14 | 1.647 | 440.94 | 726.22818 | | | 0.005162527 |
| 15 | 1.542 | 440.94 | 679.92948 | | | 0.002404745 |
| 16 | 1.689 | 440.94 | 744.74766 | | | 0.006003695 |
| 17 | 1.509 | 440.94 | 665.37846 | | | 0.001687534 |
| 18 | 1.622 | 440.94 | 715.20468 | | | 0.004525015 |
| 19 | 1.535 | 440.94 | 676.8429 | | | 0.002240893 |
| 20 | 1.618 | 440.94 | 713.44092 | | | 0.004417733 |
| 21 | 1.609 | 440.94 | 709.47246 | | | 0.004173307 |
| 22 | 1.823 | 440.94 | 803.83362 | | | 0.005383027 |
| 23 | 1.561 | 440.94 | 688.30734 | | | 0.002876621 |
| 24 | 1.615 | 440.94 | 712.1181 | | | 0.004336662 |
| 25 | 1.642 | 440.94 | 724.02348 | | | 0.005040826 |
| 26 | 1.862 | 440.94 | 821.03028 | | | 0.004403917 |
| 27 | 1.818 | 440.94 | 801.62892 | | | 0.005493021 |
| 28 | 1.883 | 440.94 | 830.29002 | | | 0.003829885 |
| 29 | 1.541 | 440.94 | 679.48854 | | | 0.002380982 |
| 30 | 1.735 | 440.94 | 765.0309 | | | 0.00640006 |
| 31 | 1.673 | 440.94 | 737.69262 | | | 0.005727566 |
| 32 | 1.889 | 440.94 | 832.93566 | | | 0.003665169 |
| 33 | 1.958 | 440.94 | 863.36052 | | | 0.001941979 |
| 34 | 1.911 | 440.94 | 842.63634 | | | 0.003071778 |
| 35 | 1.679 | 440.94 | 740.33826 | | | 0.005838361 |
| 36 | 1.777 | 440.94 | 783.55038 | | | 0.006184859 |
| 37 | 1.919 | 440.94 | 846.16386 | | | 0.002863431 |
| 38 | 1.951 | 440.94 | 860.27394 | | | 0.002093873 |
| 39 | 1.588 | 440.94 | 700.21272 | | | 0.003597072 |
| 40 | 1.582 | 440.94 | 697.56708 | | | 0.003433598 |

| | | | | | | |
|----|-------|--------|-----------|--|--|-------------|
| 41 | 1.637 | 440.94 | 721.81878 | | | 0.004915833 |
| 42 | 1.919 | 440.94 | 846.16386 | | | 0.002863431 |
| 43 | 1.872 | 440.94 | 825.43968 | | | 0.004131932 |
| 44 | 1.846 | 440.94 | 813.97524 | | | 0.004826268 |
| 45 | 1.528 | 440.94 | 673.75632 | | | 0.002083086 |
| 46 | 1.591 | 440.94 | 701.53554 | | | 0.003679216 |
| 47 | 1.662 | 440.94 | 732.84228 | | | 0.005504032 |
| 48 | 1.715 | 440.94 | 756.2121 | | | 0.006306214 |
| 49 | 1.71 | 440.94 | 754.0074 | | | 0.006263327 |
| 50 | 1.826 | 440.94 | 805.15644 | | | 0.005314894 |
| 51 | 1.711 | 440.94 | 754.44834 | | | 0.00627251 |
| 52 | 1.578 | 440.94 | 695.80332 | | | 0.00332543 |
| 53 | 1.743 | 440.94 | 768.55842 | | | 0.006401968 |
| 54 | 1.899 | 440.94 | 837.34506 | | | 0.003392609 |
| 55 | 1.786 | 440.94 | 787.51884 | | | 0.006069511 |
| 56 | 1.502 | 440.94 | 662.29188 | | | 0.001554458 |
| 57 | 1.514 | 440.94 | 667.58316 | | | 0.001786821 |
| 58 | 1.961 | 440.94 | 864.68334 | | | 0.001878891 |
| 59 | 1.567 | 440.94 | 690.95298 | | | 0.003032659 |
| 60 | 1.614 | 440.94 | 711.67716 | | | 0.004309538 |
| 61 | 1.571 | 440.94 | 692.71674 | | | 0.003138213 |
| 62 | 1.591 | 440.94 | 701.53554 | | | 0.003679216 |
| 63 | 1.92 | 440.94 | 846.6048 | | | 0.002837762 |
| 64 | 1.562 | 440.94 | 688.74828 | | | 0.002902422 |
| 65 | 1.607 | 440.94 | 708.59058 | | | 0.004118583 |
| 66 | 1.906 | 440.94 | 840.43164 | | | 0.003204404 |
| 67 | 1.644 | 440.94 | 724.90536 | | | 0.005089923 |
| 68 | 1.71 | 440.94 | 754.0074 | | | 0.006263327 |
| 69 | 1.582 | 440.94 | 697.56708 | | | 0.003433598 |
| 70 | 1.658 | 440.94 | 731.07852 | | | 0.005416781 |
| 71 | 1.908 | 440.94 | 841.31352 | | | 0.003151154 |
| 72 | 1.521 | 440.94 | 670.66974 | | | 0.001931644 |
| 73 | 1.68 | 440.94 | 740.7792 | | | 0.005856008 |
| 74 | 1.658 | 440.94 | 731.07852 | | | 0.005416781 |
| 75 | 1.562 | 440.94 | 688.74828 | | | 0.002902422 |
| 76 | 1.883 | 440.94 | 830.29002 | | | 0.003829885 |
| 77 | 1.677 | 440.94 | 739.45638 | | | 0.005802356 |
| 78 | 1.562 | 440.94 | 688.74828 | | | 0.002902422 |
| 79 | 1.705 | 440.94 | 751.8027 | | | 0.006212947 |
| 80 | 1.619 | 440.94 | 713.88186 | | | 0.004444647 |

Kekuatan Material

| Siklus | SF Random | Load (kN) | Load * SF | Avg | Std Dev | Dist |
|--------|-----------|-----------|-----------|----------|----------|-------------|
| 1 | 2.057 | 572 | 1176.604 | 1290.133 | 83.68011 | 0.00189933 |
| 2 | 2.274 | 572 | 1300.728 | | | 0.004729405 |
| 3 | 2.394 | 572 | 1369.368 | | | 0.003045059 |
| 4 | 2.288 | 572 | 1308.736 | | | 0.004651098 |
| 5 | 2.01 | 572 | 1149.72 | | | 0.001166521 |
| 6 | 2.478 | 572 | 1417.416 | | | 0.001499282 |
| 7 | 2.037 | 572 | 1165.164 | | | 0.001563115 |
| 8 | 2.16 | 572 | 1235.52 | | | 0.003852988 |
| 9 | 2.178 | 572 | 1245.816 | | | 0.004143662 |
| 10 | 2.061 | 572 | 1178.892 | | | 0.001970373 |
| 11 | 2.355 | 572 | 1347.06 | | | 0.003782604 |
| 12 | 2.119 | 572 | 1212.068 | | | 0.003085367 |
| 13 | 2.362 | 572 | 1351.064 | | | 0.003657268 |
| 14 | 2.417 | 572 | 1382.524 | | | 0.002591649 |
| 15 | 2.269 | 572 | 1297.868 | | | 0.004747142 |
| 16 | 2.308 | 572 | 1320.176 | | | 0.004469897 |
| 17 | 2.493 | 572 | 1425.996 | | | 0.00127605 |
| 18 | 2.457 | 572 | 1405.404 | | | 0.001846014 |
| 19 | 2.146 | 572 | 1227.512 | | | 0.003603171 |
| 20 | 2.075 | 572 | 1186.9 | | | 0.002227456 |
| 21 | 2.305 | 572 | 1318.46 | | | 0.004501981 |
| 22 | 2.01 | 572 | 1149.72 | | | 0.001166521 |
| 23 | 2.101 | 572 | 1201.772 | | | 0.002730045 |
| 24 | 2.034 | 572 | 1163.448 | | | 0.001515652 |
| 25 | 2.421 | 572 | 1384.812 | | | 0.00251364 |
| 26 | 2.218 | 572 | 1268.696 | | | 0.004613575 |
| 27 | 2.05 | 572 | 1172.6 | | | 0.001777913 |
| 28 | 2.338 | 572 | 1337.336 | | | 0.004066223 |
| 29 | 2.083 | 572 | 1191.476 | | | 0.002379349 |
| 30 | 2.213 | 572 | 1265.836 | | | 0.004570687 |
| 31 | 2.464 | 572 | 1409.408 | | | 0.001726283 |
| 32 | 2.286 | 572 | 1307.592 | | | 0.004664819 |
| 33 | 2.314 | 572 | 1323.608 | | | 0.004400857 |
| 34 | 2.144 | 572 | 1226.368 | | | 0.003566163 |
| 35 | 2.263 | 572 | 1294.436 | | | 0.004761168 |
| 36 | 2.003 | 572 | 1145.716 | | | 0.001075292 |
| 37 | 2.286 | 572 | 1307.592 | | | 0.004664819 |
| 38 | 2.11 | 572 | 1206.92 | | | 0.002907771 |
| 39 | 2.042 | 572 | 1168.024 | | | 0.00164401 |
| 40 | 2.427 | 572 | 1388.244 | | | 0.002397644 |

| | | | | | | |
|----|-------|-----|----------|--|--|-------------|
| 41 | 2.364 | 572 | 1352.208 | | | 0.003384701 |
| 42 | 2.357 | 572 | 1348.204 | | | 0.00352819 |
| 43 | 2.371 | 572 | 1356.212 | | | 0.003239136 |
| 44 | 2.267 | 572 | 1296.724 | | | 0.00484168 |
| 45 | 2.285 | 572 | 1307.02 | | | 0.004693749 |
| 46 | 2.316 | 572 | 1324.752 | | | 0.004284371 |
| 47 | 2.141 | 572 | 1224.652 | | | 0.003829594 |
| 48 | 2.265 | 572 | 1295.58 | | | 0.004853566 |
| 49 | 2.092 | 572 | 1196.624 | | | 0.00282379 |
| 50 | 2.264 | 572 | 1295.008 | | | 0.004859157 |
| 51 | 2.103 | 572 | 1202.916 | | | 0.003055318 |
| 52 | 2.14 | 572 | 1224.08 | | | 0.003810407 |
| 53 | 2.138 | 572 | 1222.936 | | | 0.003771756 |
| 54 | 2.125 | 572 | 1215.5 | | | 0.003512812 |
| 55 | 2.332 | 572 | 1333.904 | | | 0.004011444 |
| 56 | 2.245 | 572 | 1284.14 | | | 0.004919854 |
| 57 | 2.445 | 572 | 1398.54 | | | 0.001753072 |
| 58 | 2.234 | 572 | 1277.848 | | | 0.004914796 |
| 59 | 2.458 | 572 | 1405.976 | | | 0.001530139 |
| 60 | 2.339 | 572 | 1337.908 | | | 0.003881981 |
| 61 | 2.197 | 572 | 1256.684 | | | 0.004685979 |
| 62 | 2.099 | 572 | 1200.628 | | | 0.002971078 |
| 63 | 2.359 | 572 | 1349.348 | | | 0.003487452 |
| 64 | 2.054 | 572 | 1174.888 | | | 0.00205339 |
| 65 | 2.138 | 572 | 1222.936 | | | 0.003771756 |
| 66 | 2.184 | 572 | 1249.248 | | | 0.004534168 |
| 67 | 2.48 | 572 | 1418.56 | | | 0.001192457 |
| 68 | 2.225 | 572 | 1272.7 | | | 0.004888704 |
| 69 | 2.32 | 572 | 1327.04 | | | 0.004219485 |
| 70 | 2.007 | 572 | 1148.004 | | | 0.001253562 |
| 71 | 2.481 | 572 | 1419.132 | | | 0.001178343 |
| 72 | 2.041 | 572 | 1167.452 | | | 0.00181121 |
| 73 | 2.373 | 572 | 1357.356 | | | 0.003197275 |
| 74 | 2.15 | 572 | 1229.8 | | | 0.003997722 |
| 75 | 2.436 | 572 | 1393.392 | | | 0.001916694 |
| 76 | 2.027 | 572 | 1159.444 | | | 0.001567425 |
| 77 | 2.243 | 572 | 1282.996 | | | 0.004921139 |
| 78 | 2.205 | 572 | 1261.26 | | | 0.004761958 |
| 79 | 2.389 | 572 | 1366.508 | | | 0.002860698 |
| 80 | 2.475 | 572 | 1415.7 | | | 0.001264657 |

BIODATA PENULIS



Penulis bernama lengkap Sarin Azistarini, dilahirkan dari keluarga sederhana di Pamekasan, 26 Maret 1995, merupakan anak pertama dari empat bersaudara pasangan Bapak dr. Ahmad Aziz dan Ibu Erma Sari, S.Sos. Yang beralamat di Desa Pejagan, Kecamatan Bangkalan, Kabupaten Bangkalan. Pendidikan formal pertama adalah SDN 3 Banyuajuh, SMPN 1 Kamal, SMAN 1 Bangkalan, dan berkuliah di D3 Teknik Mesin Produksi Kerjasama ITS-DISNAKERTRANSDUK Prov. Jawa Timur melalui seleksi ujian masuk D3 pada tahun 2013. Kemudian penulis melanjutkan pendidikan Lintas Jalur di S1 Teknik Mesin ITS pada tahun 2016 dan terdaftar dengan NRP 02111645000060.

Di jurusan D3 Teknik Mesin Produksi Kerjasama ITS-DISNAKERTRANSDUK ini penulis mengambil spesialisasi di program studi Manufaktur sedangkan saat Lintas Jalur di S1 Teknik Mesin Penulis mengambil lab keahlian Otomasi Industri. Penulis dikenal aktif mengikuti kegiatan Program Kreativitas Mahasiswa ITS pada tahun 2013, 2014, dan 2015. Penulis sempat merasakan magang di PT. PAL INDONESIA (Persero) di Divisi Machinery and Assembly, dan Divisi General Engineering pada tahun 2015, dan di PT. YTL Jawa Timur di Divisi Material Handling pada tahun 2018. Selain itu, ketertarikan penulis terhadap dunia manufaktur mendorongnya berperan aktif untuk menerapkan keterampilannya di dalam maupun di luar kampus, yang disumbangkan dengan peran aktif di Organisasi Forum Komunikasi M3NER-ITS 2014-2016 sebagai anggota dan kepala departemen, serta mengikuti berbagai kegiatan kepanitiaan yang diadakan oleh ITS salah satunya yaitu GERIGI ITS 2014 dan GERIGI ITS 2015.